

# 基于模糊理论的燃气轮机可靠性分配

赵德孜<sup>1</sup>, 温卫东<sup>1</sup>, 段成美<sup>2</sup>

(1,南京航空航天大学,江苏 南京 210016;2,海军航空工程学院青岛分院,山东 青岛 266041)

**摘 要:**根据模糊理论提出了一种燃气轮机可靠性分配的新方法。该分配方法的核心是应用模糊决策理论中的多级模糊综合评判方法评估部件之间的相对失效系数,然后依此对燃气轮机失效率指标或可转换为失效率的可靠性指标进行线性分配。特点是分配时能够综合考虑各种可靠性影响因素及其模糊性,尤其适用于燃气轮机这种复杂产品初始设计阶段的可靠性分配。

**关 键 词:**燃气轮机;可靠性;失效率;模糊决策;可靠性分配

中图分类号:TE14.3 文献标识码:A 文章编号:1009-2889(2003)04-0044-04

## 0 引 言

燃气轮机的可靠性分配是燃气轮机可靠性设计的重要环节之一。根据国军标 GB450-88 规定,产品的可靠性分配应在初始设计阶段(方案的论证及设计阶段)内进行。由于燃气轮机属于多发性故障、多故障模式类别的复杂机电产品(对于采用数控系统的燃气轮机而言),其可靠性数据统计的结果会因统计方法的不同相差很大,且不同型号及类型的燃气轮机的可靠性数据也往往具有较大的特异性,因而在初始设计阶段,适用于燃气轮机可靠性分配的可靠性数据或是不足、或是可信性不大。我国研制燃气轮机的经验较为缺乏,这个问题更为突出。另一方面,影响燃气轮机可靠性的因素很多,且在初始设计阶段大多具有不同程度的模糊性。因此,初始设计阶段的燃气轮机可靠性分配实质上是一种模糊决策,常规的分配方法<sup>[1]</sup>或是不适用、或是应用效果不佳。为此,下面将模糊理论引入燃气轮机的可靠性分配,提出一种新的可靠性分配方法。

## 1 燃气轮机可靠性分配的基本特点、依据及思路

### 1.1 燃气轮机可靠性的特点

燃气轮机主要由主机(包括压气机、燃烧室、燃气涡轮、动力涡轮、减速器及附件传动装置)和辅机系统串联而成,而且主机各部、组件之间以及辅机系

统各附件之间皆为串联关系,故燃气轮机可靠性的分配可按串联系统处理,分配层次如图 1 所示。需要指出的是,在作为整个动力装置应用时,燃气轮机装置还设有进、排气装置,考虑到进、排气装置往往视具体的应用而定,故这里不作考虑。

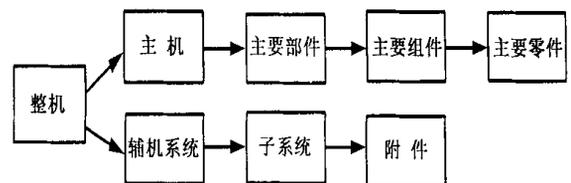


图 1 燃气轮机可靠性的分配层次

燃气轮机可靠性的分配参数通常是可靠度  $R(t)$ 、失效率  $\lambda(t)$  或平均故障间隔时间 MTBF。在分配时,整机、各组件和各附件等的寿命分布均可认为服从指数分布规律。在初次将整机可靠性指标分配给主机及附机系统(第 1 层次的分配)时,可以采取等价分配的方法。其它层次的可靠性分配方法正是本文所要研究的。下面以主机的失效率指标分配给主要部件为例加以阐述。

### 1.2 分配的基本依据及思路

合理的可靠性分配原则应该是在相关的约束条件(成本、重量、进度等)下,保证分配结果既能满足可靠性指标的要求,又能得以实现。前者与给定的条件有关,后者则取决于各主要部件能够通过的可靠性水平,因而可靠性分配的基本依据是各主要部件间的相对可靠性水平。为此,运用模糊数学的决

策理论,确定各主要部件间的相对可靠性水平,并由此得出它们的相对失效系数,最后依此对主机的失效率指标进行线性分配。

## 2 可靠性分配的基本方法

某型燃气轮机工作 500 小时的可靠性指标  $R_s^*$  ( $500 = 0.92$ ),其寿命分布可认为服从指数分布规律,则有  $s^* = -\ln R_s^* / t = (-\ln 0.92) / 500 = 16.676 \times 10^{-5} / \text{h}$ 。第 1 层次的分配采取等价分配方法,则分配给燃气轮机主机和附机系统的可靠性指标相同: $R_1^*(500) = 0.9592$ ,  $r_1^* = 8.3311 \times 10^{-5} / \text{h}$ 。现要求将主机的可靠性指标分配给各主要部件。

### 2.1 确定部件可靠性的因素集和因素子集

因素集是以影响主要部件可靠性的因素为元素所组成的一个普通集合。由于影响部件可靠性的因素很多,其权重值不仅难以决定,而且会因“归一化”的要求变得很小,不易体现主要因素的作用,从而影响模糊决策的合理性。因此,首先根据影响因素的属性,将影响部件可靠性的因素归纳为设计、试验、制造、部件属性和使用属性五类(类因素),以类因素为元素,组成因素集  $U$ ,则有

$$U = \{\text{设计, 试验, 制造, 部件属性, 使用属性}\} = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5\}$$

再将类因素  $U_i (i = 1, 2, \dots, 5)$  进一步细分为若干个基本因素(子因素),由此组成因素子集

$$U_1 = \{\text{设计规范, 设计理论, 设计经验}\} = \{u_{11}, u_{12}, u_{13}\}$$

$$U_2 = \{\text{试验规范, 试验技术, 试验设备}\} = \{u_{21}, u_{22}, u_{23}\}$$

$$U_3 = \{\text{工艺, 设备, 材料, 质保}\} = \{u_{31}, u_{32}, u_{33}, u_{34}\}$$

$$U_4 = \{\text{复杂度, 技术成熟度, 监控技术}\} = \{u_{41}, u_{42}, u_{43}\}$$

$$U_5 = \{\text{工作条件, 使用任务}\} = \{u_{51}, u_{52}\}$$

这里,每个类因素的子因素数目可以不同,但必须满足条件: $\bigcup_{i=1}^5 U_i = U; U_i \cap U_j = \emptyset, i \neq j$ 。诸因素对燃气轮机可靠性的基本影响见文献<sup>[1,2]</sup>。此外,类因素  $U_4$  和  $U_5$  中一般还应分别包括子因素“重要度”(部件故障引起整机故障的概率)和“工作时间”,前者因燃气轮机各部件为串联,后者因燃气轮机各部件的工作时间等同于整机,故这里均可忽略。

### 2.2 建立部件可靠性的评价集及因素权重集

部件可靠性的评价集  $V$  是由评价对象(各部件的可靠性水平)所组成的普通集合。这里,各部件的可靠性水平简称为部件的名称,则

$$V = \{\text{压气机, 燃烧室, 燃气涡轮, 动力涡轮, 减速度器, 附件传动装置}\} = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\}$$

各个因素对部件可靠性的影响通常是不同的,故需要对每个类因素及子因素赋予一个相应的权重值,即要建立因素的权重集(因素集或因素子集上的模糊子集)。权重集的建立往往具有较强的主观性,其合理性将在很大程度上影响模糊决策结果的合理性。为此,提出一种新的权重赋值方法,其基本思路是:先应用模糊决策理论中的相对比较法<sup>[3]</sup>,按其对应部件可靠性的影响大小进行模糊排序,然后将排序第一的因素权重值定为 1,以此为标准,再依据相似机型的可靠性数据及专家经验确定其因素的权重值,最后进行归一化处理。本例的权重赋值结果如下:

$$W = (0.316, 0.211, 0.263, 0.126, 0.084);$$

$$W_1 = (0.37, 0.42, 0.21);$$

$$W_2 = (0.31, 0.38, 0.31);$$

$$W_3 = (0.305, 0.174, 0.304, 0.217);$$

$$W_4 = (0.33, 0.48, 0.19);$$

$$W_5 = (0.58, 0.42)$$

### 2.3 评定部件间的相对可靠性水平

部件之间的相对可靠性水平是燃气轮机主件可靠性分配的依据。为此,先进行单因素模糊评判,即根据相关可靠性数据或专家经验,确定  $U_i (i = 1, 2, \dots, 5)$  中每个子因素对各评价集元素的隶属度,进而得到单个子因素的模糊评判矩阵  $A_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ ,它实际上反映了因素子集和评价集之间的模糊关系,是一种模糊关系矩阵。评判的结果为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.86 & 0.73 & 0.82 & 0.85 & 0.97 & 0.98 \\ 0.88 & 0.77 & 0.85 & 0.86 & 0.96 & 0.98 \\ 0.91 & 0.84 & 0.88 & 0.89 & 0.95 & 0.97 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0.91 & 0.86 & 0.88 & 0.88 & 0.95 & 0.97 \\ 0.93 & 0.89 & 0.90 & 0.91 & 0.98 & 0.98 \\ 0.89 & 0.83 & 0.85 & 0.87 & 0.94 & 0.96 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0.78 & 0.75 & 0.72 & 0.75 & 0.92 & 0.96 \\ 0.86 & 0.81 & 0.83 & 0.83 & 0.91 & 0.96 \\ 0.89 & 0.86 & 0.81 & 0.82 & 0.92 & 0.98 \\ 0.87 & 0.87 & 0.87 & 0.87 & 0.93 & 0.93 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0.68 & 0.91 & 0.77 & 0.82 & 0.89 & 0.85 \\ 0.84 & 0.88 & 0.81 & 0.89 & 0.91 & 0.94 \\ 0.86 & 0.75 & 0.82 & 0.87 & 0.89 & 0.88 \\ 0.81 & 0.66 & 0.62 & 0.69 & 0.87 & 0.93 \\ 0.73 & 0.70 & 0.61 & 0.65 & 0.79 & 0.94 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 0.81 & 0.66 & 0.62 & 0.69 & 0.87 & 0.93 \\ 0.73 & 0.70 & 0.61 & 0.65 & 0.79 & 0.94 \end{bmatrix}$$

由于上述评判结果的合理性是合理分配可靠性指标的关键因素之一,故有必要作几点说明:(1)单因素模糊决策矩阵  $A_1$  中的隶属度  $\mu_{11} = 0.86$ ,其物理意义就是压气机设计规范的完善程度为 86%,其余的以此类推;(2)有利于提高部件可靠性的子因素,其隶属度就应取较大的值,反之,隶属度就应取较小的值;(3)由于这里的可靠性分配实质上是针对

$$A = \begin{bmatrix} 0.8789 & 0.7699 & 0.8452 & 0.8626 & 0.9616 & 0.9779 \\ 0.9114 & 0.8621 & 0.8783 & 0.8883 & 0.9583 & 0.9707 \\ 0.8469 & 0.8199 & 0.7991 & 0.8112 & 0.9204 & 0.9596 \\ 0.7910 & 0.8652 & 0.7987 & 0.8631 & 0.8996 & 0.8989 \\ 0.7764 & 0.6768 & 0.6158 & 0.6732 & 0.8364 & 0.9342 \end{bmatrix}$$

相应地,反映各部件之间相对可靠性水平的二级模糊综合评判集为:

$$C = W_0 \cdot A = (0.8577, 0.8067, 0.8149, 0.8387, 0.9317, 0.9579)$$

### 2.4 可靠性指标的分配

这里提出的可靠性指标分配方法是基于串联系统失效率等于分系统失效率之和的特点,因而需要求出各部件之间的相对失效率。设模糊集  $F = 1$

固有可靠性的,故在运用可靠性数据或专家经验时,应该剔除诸如鸟撞之类意外因素所造成的故障以及使用不当所造成的故障。

首先,对子因素进行综合评判。根据模糊变换原理<sup>[3]</sup>,通过模糊矩阵的合成,可以得到一级模糊综合评判集  $B_i = W_i \circ A_i$ ,它实际上也是对单个因素的模糊评判。这里,合成运算“ $\circ$ ”采用“ $\times, +$ ”模糊算子<sup>[3]</sup>,以便综合考虑子因素的影响。为了综合评判类因素,即综合评判所有的影响因素,还必须进行二级模糊综合评判。显然,二级模糊综合评判矩阵  $A = [B_1, B_2, \dots, B_5]^T$ 。于是,我们有:

$- C = (f_1, f_2, \dots, f_6)$ ,元素  $f_i (i = 1, 2, \dots, 6)$  的大小反映了  $i$  部件相对于其它部件可能失效的程度。对模糊集  $F$  进行归一化处理,所得模糊集  $F$  就是部件相对失效率系数的模糊集合。采用线性分配原则,则部件失效指标的普通集合  $= {}^*F$ 。具体的分配结果如表 1 所示。

表 1 发动机主件可靠性分配的结果

可靠性指标	压气机	燃烧室	燃气涡轮	动力涡轮	减速器	辅机传动装置	总计
失效率 ( $\times 10^{-5}/h$ )	1.4966	2.0324	1.9458	1.6964	0.7177	0.4422	8.3311
可靠度 (500h)	0.9925	0.9899	0.9903	0.9916	0.9964	0.9978	0.9592

## 3 结语

上述可靠性分配方法能够综合考虑各种可靠性影响因素及其模糊性,尤其适用于燃气轮机之类复杂产品初始设计阶段的可靠性分配,其核心是应用模糊决策理论中的多级模糊综合评判方法评估部件之间的相对失效率,其中的权重赋值和隶属度通常仍含有人的主观因素。但是,由于综合评判时将各影响因素分为二个层次进行评判,人的主观因素被限制在单一的很小范围内,主观评判可以做得较准确,使主客观之间的差异大为减小,加之模糊排序方法在权重赋值中的应用,从而能保证评判结果较

为准确。这里实际分配的是固有可靠性指标,如果在因素集  $U$  中加入类因素“使用维护”(包括维修体系、维修难度、人员素质、存贮等子因素),该方法也可用于使用可靠性的分配。需要指出的是,该分配方法仅适用于串联系统失效率指标及其可转换为失效率的可靠性指标的分配。

### 参考文献:

[1]孔瑞莲等. 航空发动机可靠性工程[M]. 北京:航空工业出版社, 1996.  
 [2]航空发动机可靠性和经济性[M]. 北京:国防工业出版社, 1998.  
 [3]张俊福等. 应用模糊数学[M]. 北京:地质出版社, 1988.

## Reliability Allocation of GT Based on Fuzzy Theory

ZHAO De-zi<sup>1</sup>, WEN Wei-dong<sup>1</sup>, DUAN Cheng-mei<sup>2</sup>

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016;

2. Qingdao Branch of Naval Aeronautics Engineering Institute, Qingdao 266041 China)

**Abstract:** The novel approach to gas turbine (GT) reliability allocation based on fuzzy theory is proposed. Its key point is that the method of multistage fuzzy synthetical judgement is used for assessing the relative failure coefficients of the assessed components. Then the failure rate or reliability targets that can be converted into the failure rate for GT are linearly allocated. The essential feature of this approach is that it can synthetically consider a variety of the factors affecting the reliability and their fuzziness. Thus the approach is particularly adaptable to the reliability allocation in initial design stage for complex products.

**Keyword:** Gas turbine Reliability Failure rate Fuzzy decision-making Reliability allocation

(上接第 26 页)

表 2

			1 号燃机	2 号燃机	汽机	联合循环
GT13D	功率 MW	15	89.68	91.79	82.18	263.7
	效率 %	15	30.26	30.63		44.24
GT13DM	功率 MW	15	95.03	99.35	86.91	281.3
	效率 %	15	31.57	32.05		46.00

### 5 机组运行点的变化与性能增加的定性分析

由于不具备进行机组热力计算所需的相关资料,因此只能根据燃机结构的具体变化和实际运行参数对 GT13DM 性能与热力参数的改变作定性分析与讨论。

对压气机而言,透平进口段通流面积的增加(透平进口温度  $T_3$  维持不变),相当于起到“开大节流门”作用。压气机增压比  $c$  下降,空气流量略有增大。既机组的运行点由 a 移至 b,远离喘振动界,见图 8。

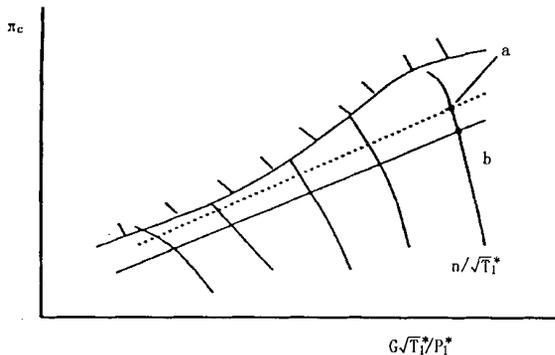


图 8 燃机运行点的变化

机组调试时的数据,经换算到环境温度 15 的条件下,压气机增压比由原来的 11.9 降低至 10.6,实测的压气机空气流量增加约 1.5%。

在透平出口压力  $P_4$  不变的情况下,压气机增压比  $c$  的下降(其耗功减小),导致透平膨胀比  $\tau$  减小。透平内效率  $\tau$ ,因第 2.1 节所述的诸多改进项目旨在减小叶型与通道的流动损失、级间泄漏损失,而得到较大幅度的提高。

GT13DM 之所以能在透平膨胀比  $\tau$  减小的情况下功率有所增加,依赖于透平内效率的提高与参加做功的燃气流量的增大;而机组效率的增加则主要取决于透平内效率的提高。

### 6 结语

GT13DM 燃气轮机发电机组在“二拖一”联合循环运行方式下已运转半年,其出力的增加与油耗的降低,已显示出机组升级所带来的益处。热通道部件通过在冷却、结构等方面的改进,其使用寿命的延长有待在使用中进一步的验证。

GT13DM 燃气轮机是双燃料的机组,只需配备燃用液化石油气所需的机外设备,即可配合广东 LNG 的能源工程,实现油改气的规划。届时,机组升级的优越性将会得到更充分的体现。