

燃气轮机可靠度的模糊预计与优化分配

赵德孜

(海军航空工程学院青岛分院, 山东 青岛 266041)

摘 要:在用模糊数量化模糊信息的基础上,改进了常规的模糊综合评判方法,并用此方法对燃气轮机子系统的可靠度进行模糊预计,得到它们的可靠度置信区间。然后在此基础上,以研制费用作为资源约束,提出一个具有实际工程应用价值的燃气轮机可靠度优化分配模型。

关 键 词:燃气轮机;可靠性;可靠性预计;优化分配;模糊决策

中图分类号:TB114.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2889(2005)01-0047-05

1 引言

可靠性预计常常作为可靠性分配的基础,两者关系密切,都是可靠性设计的重要环节。由于在新机的设计初期,往往缺乏适用的可靠性数据,致使影响燃气轮机可靠性的因素具有一定的模糊性,这时的可靠性预计与分配实质上是权衡众多因素的决策问题,而基于传统数学的常规方法^[1,2]很难得出较合理的决策结果。为此,上世纪九十年代起有些学者提出了一些基于模糊理论的预计方法,从而为解决该问题提供了一种有效的新途径,并取得了一定的成效。但这些方法仍有一些局限性,如以失效率为常数作为前提^[3~6],在应用于机械和机电产品时效果欠佳;适用于设计初期的方法^[5~7]采用的是常规模糊综合评判模型,其不足之处有待进一步改进。此外,现有的模糊优化分配往往将可靠性分配与可靠性预计分开研究,如文献[8~11],若将两者结合起来综合考虑则会更为合理。

本文针对燃气轮机可靠性的特点,在改进常规模糊综合评判模型的基础上,提出了一种燃气轮机可靠度预计与优化分配的综合方法。

2 可靠度的模糊预计

燃气轮机主要由发动机机体(简称机体)与附件系统(控制系统、润滑系统、电气系统及监控系统等)串联组成。这里,机体和附件系统统称为子系统。

不同的研制阶段其可靠性预计的对象不同。在设计初期,应以子系统级为可靠性预计的对象。一般说来,随着研制进程的不断深入,可获得的可靠性数据不断增加,可靠性预计的对象也应该逐步向零件级细化,只要分别预计出各个系统的可靠性,就可以根据可靠性模型预计出燃气轮机的可靠性。因此,下面以子系统的可靠度为对象,阐述可靠性模糊预计的方法。需要指出的是,该方法的基本思想同样适用于各个层次的可靠度模糊预计。

可靠度模糊预计的基本思想是在用模糊数量化模糊信息的基础上,改进常规的运用模糊综合评判方法,然后将此方法作为子系统可靠度模糊预计的工具。限于篇幅,这里以一级模糊综合评判为例加以阐述。

2.1 确定子系统可靠度的因素集和备择集

首先,建立模糊综合评判所需的因素集和备择集:以影响子系统可靠度的因素为元素,建立因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$;以子系统可能具备的可靠度为元素,建立备择集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。

2.2 确定可靠度影响因素的权重集

由于各个影响因素对可靠度的影响程度不同,故需在确定影响因素权重的基础上,建立权重集 \tilde{w} 。确定权重的方法有多种,但在决策信息欠缺时,较为适用的是专家评分法,这是因为它能利用专家的经验来弥补决策信息的不足。但现行的专家评分是一个确定值,这与决策信息不足的实际情况不符,

* 收稿日期:2004-11-01

需要改进。模糊数的特点是能够表达“大约为 6”、“非常接近于 3”、“远大于 5”等模糊概念,因而它是一种表示模糊信息的有效方法。如果专家用模糊数给影响因素赋权,权重集会合理并会提高模糊综合评判结果的可信度,因而合理的权重应该是一个模糊数。模糊数有多种,这里采用的是三角正模糊数。它的特点不仅是便于计算,而且其参数在决策信息欠缺时也宜于确定。三角正模糊数的隶属函数为:

$$\tilde{I}(X) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq m \\ (x - L) / (m - L) & L < x < m \\ (R - x) / (R - m) & m < x < R \\ 0 & x \geq R \end{cases}$$

其中, m 对应于隶属度为 1 的数。令 $L = m - \alpha$, $R = m + \beta$, 则三角模糊数 \tilde{I} 可以用三元组表示, 即 $\tilde{I} = (m, \alpha, \beta)$ 。这里, α 和 β 分别称为模糊数的左、右分布参数, 它们反映了 \tilde{I} 所含信息的模糊性。例如, $\alpha = \beta = 0$ 时, 隶属函数对称分布, \tilde{I} 表示“大约为 m ”(下面简写成 $\tilde{I} = (m,)$), m 为模糊数的均值, 且分布参数大, 模糊性就强; 又如, $\alpha > \beta$ 时, \tilde{I} 意为“大约为 m , 但略小于 m 的可能性较大”, 且 α 越比 β 大, 这种可能性也就越大。由此可见, 通过调整分布参数 α 和 β , \tilde{I} 可能较好地表达模糊信息, 从而使专家们能够给出更为合理的评价。

设参与权重赋值的专家人数为 K ; 模糊数 \tilde{w}_{ij} ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k$) 是第 j 位专家给因素 u_i 评定的权重; \tilde{w}_{ij} 的截集 $\tilde{w}_{ij}^{(\lambda)} = [a_{ij}^{(\lambda)}, b_{ij}^{(\lambda)}]$ 。这里, 阈值 λ 也称为置信水平^[12], 即区间 $\tilde{w}_{ij}^{(\lambda)}$ 的置信水平是 λ , 因而 $\tilde{w}_{ij}^{(\lambda)}$ 也相应地称为置信区间。需要指出的是, 这里的置信水平概念与概率统计中区间估计的置信水平概念是有显著差别的。根据文献^[13]提出的可能性理论, 这里的置信水平是指 $\tilde{w}_{ij}^{(\lambda)}$ 隶属于模糊集合 \tilde{w}_{ij} 的可能性, 并且置信水平 λ 越高, 可能性越大, 置信区间越小, 模糊性越弱。

$\forall \lambda \in [0, 1]$, 根据 \tilde{w}_{ij} 隶属函数的反函数, 求出其截集, 然后用下列公式^[14], 求出 \tilde{w}_i (专家们给因素 u_i 评定的平均模糊权重) 的截集:

$$\tilde{w}_i^{(\lambda)} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \tilde{w}_{ij}^{(\lambda)} = \left[\frac{1}{K} \sum_{j=1}^K a_{ij}^{(\lambda)}, \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K b_{ij}^{(\lambda)} \right] \quad (1)$$

对不同的 λ 重复上述步骤, 即可得到用一系列截集表示的 \tilde{w}_i 。出于权重归一化的要求, 需对 \tilde{w}_i 进行去模糊化处理。去模糊化的方法有多种, 从权重赋值的角度出发, 应在综合考虑各专家意见的基础上取其相对集中的意见, 故这里采用质心法对 \tilde{w}_i

进行去模糊化处理。

同理也可得到其它影响因素的平均模糊权重及其去模糊化后的权重值。最后对它们进行归一化处理, 得到权重集 $\tilde{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。

2.3 单因素模糊评判

同样, 在决策信息欠缺时, 单因素模糊评判的结果具有模糊性, 现行方法用确定值表示评判结果也是不合理的, 这里改用模糊数来表示, 由此得到的单因素模糊评判矩阵 $\tilde{R} = (\tilde{r}_{ij})_{n \times m}$ 。这里, 矩阵 \tilde{R} 可以视为因素集与备择集之间的一种模糊关系。作为矩阵元素的模糊数 \tilde{r}_{ij} 表示二元组 (u_i, v_j) 隶属于该模糊关系的隶属度, 这里可理解为: 按因素 u_i 评判时, 作为评判对象的子系统可靠度取备择元素 v_j 的可能性(模糊概率)。当多名专家参与评判时, \tilde{r}_{ij} 按公式(1)计算。

2.4 模糊综合评判

模糊综合评判就是在单因素模糊评判的基础上考虑影响因素的权重, 即

$$\tilde{x} = W \cdot \tilde{R} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m) \quad (2)$$

式中, 模糊矢量 \tilde{x}_j 和模糊数 \tilde{x}_j 分别称为评判集和模糊综合评判指标, $j = 1, 2, \dots, m$; 合成运算“ \cdot ”采用 $(+, \times)$ 型模糊算子, 此算子算出的评判指标既能考虑所有因素的影响, 又能保留单因素评判的全部信息。为了得到模糊评判的结果(预计的子系统可靠度 R_{ss}), 现采用加权平均法对模糊综合评判指标作进一步的处理, 即将 \tilde{x}_j 作为权数, 以对各个备择元素 v_j 进行加权平均的值作为评判结果, 则

$$R_{ss} = \sum_{j=1}^m \tilde{x}_j v_j / \sum_{j=1}^m \tilde{x}_j \quad (3)$$

设模糊数 \tilde{r}_{ij} 的截集 $r_{ij}^{(\lambda)} = [c_{ij}^{(\lambda)}, d_{ij}^{(\lambda)}]$, 上述模糊综合评判的算法如下:

步骤一: $\forall \lambda \in [0, 1]$, 由公式(1)和公式(2)不难得到置信水平为 λ 时的评判指标, 即

$$x_j^{(\lambda)} = \left[\sum_{i=1}^n w_i c_{ij}^{(\lambda)}, \sum_{i=1}^n w_i d_{ij}^{(\lambda)} \right], j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

步骤二: 根据公式(3)和两个正区间数相除的运算法则^[14], 可以预计出置信水平为 λ 时的部件可靠度, 即

$$R^{(\lambda)} = \left[\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n v_j w_i c_{ij}^{(\lambda)}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_i d_{ij}^{(\lambda)}}, \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n v_j w_i d_{ij}^{(\lambda)}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_i c_{ij}^{(\lambda)}} \right] \quad (5)$$

步骤三: 对不同的 λ 值, 重复步骤一和步骤二, 即可以预计出不同置信水平下子系统可靠度的置信

区间。

3 可靠度的优化分配

由上述方法得到的预计结果实际上是不同置信水平下子系统可靠度的可能范围。显然,这种预计结果比用通常预计的精确值更符合设计初期决策信息欠缺的客观情况。现在的问题是在资源或可靠度指标的约束下,如何利用上述的预计结果来优化分配燃气轮机的可靠度。下面以研制费用作为资源约束,提出一个具有实际工程应用价值的可靠度优化分配模型。

在设计初期,尤其是方案论证阶段,可以近似认为子系统的研制费用 C_i 与子系统可靠度 R_i 的关系^[1]是:

$$C_i = -a_i / \ln R_i, a_i > 0 \quad (6)$$

式中的系数 a_i 可以参照同类产品或用模糊决策的方法加以确定。设燃气轮机的可靠度目标值为 R_s^* ,置信水平为 α 时燃气轮机和第 i 个子系统的可靠度分配为 $R_s^{(\alpha)}$ 和 $R_i^{(\alpha)}$,则燃气轮机可靠度的优化分配模型为:

$$\begin{aligned} \max \quad & R_s^{(\alpha)} = \prod_{i=1}^n R_i^{(\alpha)} \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} R_s^* - R_s^{(\alpha)} = 0 \\ R_{i \min}^{(\alpha)} \leq R_i^{(\alpha)} \leq R_{i \max}^{(\alpha)}, i = 1, 2, \dots, n \\ 0 < R_s^{(\alpha)} < 1 \\ \sum_{i=1}^n (-a_i / \ln R_i^{(\alpha)}) = C \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

该模型为 n 个变量的非线性优化问题,其具体解法将在后面的示例中论述。该优化分配模型的物理意义是:在研制费用给定的情况下和在各子系统可靠度可能达到的范围内,使燃气轮机的可靠度最高。它的特点在于可靠度优化分配是基于子系统可靠度模糊预计所得到的置信区间,最终得到的是各子系统在不同置信水平下的可靠度分配值,从而有利于燃气轮机设计方案的论证。

4 示例

某燃气轮机的设计任务书要求发动机首翻期的可靠度目标值不低于 0.91,研制费用为 2.5 亿元。现用上述综合模型进行燃气轮机可靠度的模糊预计及优化分配。

4.1 燃气轮机可靠度的模糊预计

限于篇幅,仅对机体的可靠度预计作详细论述。

首先以影响机体可靠度的因素为元素,建立因素集,即

$$\begin{aligned} U &= \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\} \\ &= \{\text{设计, 试验, 加工, 材料, 质保}\} \end{aligned}$$

这里,将使用环境放在设计中加以考虑,然后以机体可能具备的可靠度为元素,建立备择集。根据统计数据和经验,机体首翻期的可靠性一般为 0.92 ~ 0.97。为提高评判准确性,备择集的数值范围应适当大于预计的可能范围,而且备择元素也不宜过多,否则会因评判困难反而影响评判的准确性。因此,备择集可设置为

$$V = \{0.90, 0.92, 0.94, 0.96, 0.98, 0.99\}$$

为了便于专家给因素赋权,将评分等级设为八级:“很不重要(1)、不重要(2)、较不重要(3)、一般(4)、较重要(5)、重要(6)、很重要(7)、极为重要(8)”,括号内的模糊数为基准分,专家也可以根据实际情况给出任意两个等级之间的模糊分值。四位参与评判的专家所给出的评判如表 1 所示。

表 1 专家评定的因素模糊权重

影响因素	专家			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
设计	(8, 0.5, 0.3)	(8.5, 0.4, 0.5)	(8, 0.5)	(8, 0.6, 0.4)
试验	(6, 0.3, 0.6)	(5, 0.4, 0.5)	(7, 0.6, 0.5)	(5.5, 0.4, 0.3)
加工	(5.5, 0.6)	(5, 0.5, 0.4)	(7, 0.3, 0.6)	(6, 0.5, 0.6)
材料	(7, 0.5)	(6, 0.5, 0.3)	(6.5, 0.3)	(6, 0.5)
质保	(5, 0.5)	(4, 0.6, 0.3)	(5, 0.5)	(5, 0.3)

根据公式(1)和去模糊化的质心法并借助 MATLAB 模糊逻辑工具箱编程计算,得权重集

$$\tilde{W} = (0.2615, 0.1902, 0.1905, 0.2053, 0.1525)$$

单因素模糊评判矩阵表示为 $\tilde{R} = [\tilde{r}_1, \dots, \tilde{r}_5]^T$ 。为了便于专家评判,现将单因素模糊评判的模糊评语分成三个等级:“有可能是 m ”,采用模糊数 $(m, 0.15)$ 表示;“可能是 m ”,采用模糊数 $(m, 0.08)$ 表示;“很可能是 m ”,采用模糊数 $(m, 0.04)$ 表示。这里规定: $m \in [0, 1]$ 。对某个备择元素来讲,这种模糊评语在这里有两层含义:首先,它为机体可靠度的可能性(概率)是 m ,这点类似于现行的模糊综合评判;其次,该可能性又有“有可能、可能、很可能”三种有同的程度。显然,这种模糊评语更有利于合理评判。此外,若 $m + R > 1$ 时,则取 $m + R = 1$;若 $m - L < 0$,则取 $m - L = 0$ 。

表 2 列出了四位专家针对影响因素“设计”各自进行的单因素模糊评判。

表 2 针对影响因素“设计”的单因素评判

备择 元素	专家			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
0.90	(0.3, 0.08)	(0.2, 0.08)	(0.4, 0.15)	(0.25, 0.08)
0.92	(0.75, 0.08)	(0.8, 0.15)	(0.8, 0.04)	(0.85, 0.08)
0.94	(1, 0.04, 0)	(0.9, 0.08)	(0.95, 0.08, 0.05)	(0.95, 0.08, 0.05)
0.96	(0.9, 0.15, 0.1)	(1, 0.08, 0)	(1, 0.15, 0)	(1, 0.04, 0)
0.98	(0.7, 0.08)	(0.8, 0.08)	(0.85, 0.15)	(0.6, 0.08)
0.99	(0.2, 0.15)	(0.3, 0.08)	(0.35, 0.08)	(0.25, 0.08)

由表 2 知, 1 号专家认为, 就机体的设计水平而言, 其可靠度取 0.9 的概率“可能是 30%”, 取 0.92 的概率“可能是 75%”, 取 0.94 的概率“很可能是 100%”, 取 0.96 的概率“有可能是 90%”, 等等。用模糊权重计算程序中求平均模糊数的子程序, 可得到对因素“设计”的平均评判结果:

$$\tilde{r}_1 = [(0.2875, 0.0975), (0.8, 0.0875), (0.95, 0.07, 0.045), (0.975, 0.105, 0.025), (0.7375, 0.097), (0.275, 0.098)]$$

采用同样的方法, 可以得到对其它因素进行单因素模糊评判的平均评判结果, 结果如下:

$$\tilde{r}_2 = [(0.175, 0.087), (0.95, 0.098, 0.05), (0.988, 0.07, 0.01), (0.925, 0.08, 0.075), (0.55, 0.045), (0.2, 0.08)]$$

$$\tilde{r}_3 = [(0.275, 0.105), (0.675, 0.0975), (0.95, 0.08, 0.05), (0.95, 0.098, 0.05), (0.2875, 0.087), (0.08, 0.075, 0.08)]$$

$$\tilde{r}_4 = [(0.75, 0.105), (0.975, 0.098, 0.025), (0.8875, 0.097), (0.575, 0.0875), (0.1875, 0.08), (0.05, 0.05, 0.08)]$$

$$\tilde{r}_5 = [(0.65, 0.088), (0.913, 0.133, 0.087), (0.97, 0.08, 0.03), (0.825, 0.08), (0.225, 0.105), (0.125, 0.06)]$$

用 MATLAB 编程计算, 得到一级模糊综合评判的结果(机体的可靠性 R_1), 表 3 列出了主要的评判结果。

表 3 不同置信水平下机体可靠度的预计值

机体的 可靠度	置信水平						
	0.9	0.92	0.94	0.95	0.97	0.99	1.0
下限值	0.9178	0.9226	0.9275	0.9299	0.9348	0.9397	0.9422
上限值	0.9673	0.9622	0.9572	0.9546	0.9496	0.9447	0.9422

根据置信水平的概念, $\alpha = 1$ 时, $R_i^{(\alpha)}$ 为确定值, 从某种意义上来说, 这就失去了模糊评判的内涵, 因而建议在实际使用中取 $\alpha = 0.9 \sim 0.95$ 。

采用上述方法的基本思想, 可得到燃气轮机各子系统在不同置信水平下的可靠度预计值。需要指

出的是, 备择集的设置应视具体的评判对象而定。下面是置信水平为 0.9 时, 其它子系统的可靠度预计区间值:

控制系统的可靠度 $R_2 = [0.9533, 0.9852]$

润滑系统的可靠度 $R_3 = [0.9661, 0.9928]$

电气系统的可靠度 $R_4 = [0.9705, 0.9939]$

监控系统的可靠度 $R_5 = [0.9525, 0.9906]$

于是, 置信水平为 0.9 时, 燃气轮机可靠度的置信区间为 $R_s^{(0.9)} = [0.7814, 0.9315]$ 。

4.2 燃气轮机可靠度的优化分配

现对置信水平为 0.9 时的燃气轮机可靠度进行优化分配。这里, 设公式(6)中的系数 $a_1 = 3.68$ 、 $a_2 = 1.1$ 、 $a_3 = 0.45$ 、 $a_4 = 0.16$ 、 $a_5 = 0.32$, 单位为百万元。

为了便于应用 MATLAB 优化工具箱编程计算, 令 $x_i = -\ln R_i$, 则优化分配模型变为

$$\min (-\ln R_s) = x_1 + x_2 + x_4 + x_4 + x_5$$

$$x_1 + x_2 + x_4 + x_4 + x_5 - \ln 0.91$$

$$- \ln 0.9673 \quad x_1 \quad - \ln 0.9178$$

$$- \ln 0.9852 \quad x_2 \quad - \ln 0.9533$$

$$- \ln 0.9928 \quad x_3 \quad - \ln 0.9661$$

$$- \ln 0.9939 \quad x_4 \quad - \ln 0.9705$$

$$- \ln 0.9906 \quad x_5 \quad - \ln 0.9525$$

$$3.68x_1^{-1} + 1.1x_2^{-1} + 0.45x_3^{-1} + 0.16x_4^{-1} + 0.32x_5^{-1} = 250$$

编程计算的结果为

$$R_1 = 0.9653; R_2 = 0.9809; R_3 = 0.9877; R_4 = 0.9927; R_5 = 0.9896$$

此时, $R_s = 0.9187$, $C = 250.047$ 百万元, 说明分配结果符合设计任务书的要求。

4 结论

综上所述, 本方法主要有两个特点: 一是将可靠度模糊预计与可靠度优化分配有机的结合在一起, 得到不同置信度的预计及分配结果, 从而更具有工程实际应用价值, 尤其是在产品的设计初期; 二是利用模糊数适合于量化模糊信息的特点, 提高了模糊评判的准确性, 这个特点在示例的权重赋值和单因素评判中有所体现。事实上, 如何结合具体应用对象充分发挥模糊数的特点正是能否很好应用本方法的关键之处, 文中示例给出的只是其中的一种方法。此外, 文中可靠度模糊预计, 结合不同的资源约束就能得到不同的可靠性优化分配模型, 这也是本方法

的价值之一。

参考文献:

- [1]曾天翔. 可靠性及维修性工程手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1994.
- [2]陆廷孝,郑鹏洲. 可靠性设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [3]Bowles J. A survey of reliability prediction procedures for microelectronic devices[J]. IEEE Trans Reliability, 41(3):2~12. 1992.
- [4]Marius Bazu. A combined fuzzy - logic & physics - of - failure approach to reliability prediction[J]. IEEE Trans Reliability, 44(2):237~242. 1995
- [5]董玉革,朱文予,陈心昭. 机械系统可靠性的模糊预计[J]. 机械科学与技术,16(4):585~589. 1997.
- [6]赵德孜,温卫东,段成美. 基于模糊理论的燃气轮机可靠性分配[J]. 燃气轮机技术,16(4):44~47. 2003.
- [7]Zhao Dezi, Wen Weidong, Duan Chengmei. Application of Mechanical Reliability Predication Based on Fuzzy Theory[J]. Trans. of Nanjing Uni-

- versity of Aeronautics & Astronautics, 21(1):76~80. 2004.
- [8]Anoop K.D. Optimal apportionment of reliability & redundancy in series system under multiple objectives[J]. IEEE Trans. on Reliability, 41(4):576~582. 1992.
- [9]Ravi V, Reddy P J, Zimmermann H - J. Fuzzy Global Optimization of Complex System Reliability[J]. IEEE Trans. Fuzzy System, 8(3):241~248. 2000.
- [10]王浩,庄钊文. 基于模糊方法的系统可靠性优化分配[J]. 系统工程理论与实践, 20(8):79~82, 113. 2000.
- [11]安卫,吴晓平,陈国钧. 基于神经网络的船舶主动力装置系统可靠性优化分配[J]. 中国造船, 44(1):59~64. 2003.
- [12]Knezevic J, Odom E R. Reliability modeling of repairable systems using Petri nets and fuzzy Lambda - Tau methodology[J]. Reliability Engineering and System Safety, 73:1~17. 2001
- [13]Zadeh L A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1:3~28. 1978.
- [14]赵德孜,温卫东,段成美. 故障树模糊分析方法的研究[J]. 机械设计与制造, (4):35~37. 2003.

Fuzzy prediction and optimal allocation for gas turbine reliability

ZHAO De-zi

(Qingdao Branch of Naval Aeronautics Engineering Institute, Qingdao 266041, China)

Abstract Based on fuzzy information quantified by fuzzy numbers, the current method of fuzzy synthetical assessment is improved. The improved method is used to predict the subsystems' reliability of a gas turbine, and then the confidence intervals of the subsystems' reliability are obtained. Under the condition of developing cost of a gas turbine defined as a resource constraint, the optimal allocation model for gas turbine reliability, which is of great value to real engineering, is proposed on the basis of results of the above fuzzy prediction.

Key words :gas turbine; reliability; reliability prediction; optimal allocation; fuzzy decision - making

(上接第 42 页)

3.3.5 灭磁模块:通过灭磁可控硅及灭磁电阻(或电感)形成灭磁通路,对发电机转子进行灭磁。该灭磁可控硅的触发控制由灭磁控制模块(EDEX)实现,该模块有二路相互独立的控制回路(包括控制电源),该控制回路以灭磁开关辅助接点、整流桥工作状态、电气主保护等作为判据,任一路控制回路动作都将输出触发脉冲,保证灭磁模块的可靠投入。若二路控制回路都意外失灵,还有转子反向过电压作为灭磁可控硅的触发控制,保证发电机的安全。同时灭磁控制模块(EDEX)通过霍尔元件监测灭磁回路的电流信号并送至主控模块作为灭磁模块动作的反馈。

4 结语

以上是 EX2100 励磁系统的结构及硬件的大致

情况,与在国内燃机电厂中大量使用的 EX2000 励磁系统相比,EX2100 在安全、可靠性方面有了进一步提高。如 EX2000 的控制卡件与功率单元同处一柜对控制卡件的安全运行带来隐患,EX2100 则将两者分离;EX2100 采用主板、数据总线等技术,大大减少了卡件间接插件的数量,避免了 EX2000 常见的因接插件接触不良造成的励磁系统故障。

参考文献:

- [1]GE Industrial Systems EX2100 Digital Exciter User's Guide.
- [2]GE Industrial Systems EX2100 Static Exciter System Product Description.
- [3]黄耀群,李兴源.《同步电机现代励磁系统及其控制》[M]. 成都科技大学出版社.