

# 动态系统故障诊断方法的灰色层次评估法

张 震, 胡寿松

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

[摘要] 针对动态系统故障诊断方法评估具有多目标、多层次、多关联等特点, 在评估中引入灰色系统理论, 结合层次分析法, 提出了基于灰关联度分析法的灰色层次评估法. 该方法可以充分吸收各类底层指标信息, 把评估指标分散的不确定信息归纳成确切的指标特征值, 从而得到较准确、客观的综合评估结果. 最后, 利用灰色层次评估法对某型歼击机操纵面损伤故障的 3 种常用故障诊断方法进行性能评估. 实例研究表明, 灰色层次评估法是动态系统故障诊断方法评估中的一种可靠而有效的方法.

[关键词] 动态系统, 故障诊断, 灰色系统理论, 层次分析法, 评估

[中图分类号] TP18 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292-(2005)01-0039-04

## Application of Grey Analytic Hierarchy Process in Evaluation of the Fault Diagnosis Methods of Dynamic Systems

ZHANG Zhen HU Shousong

(School of Automation Engineering Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Jiangsu Nanjing 210016 China)

**Abstract** Aiming at the fact that the evaluation of the fault diagnostic methods in the dynamic systems have such characteristics as multi-purposes, multi-levels, and multi-relevance, the paper introduces the grey system theory and suggests a new grey hierarchical evaluating method based on grey relational analysis in combination with AHP. The method can absorb all kinds of sporadic, uncertain information and reduce them to certain value of evaluation indexes, so as to obtain the exact and objective result. In the end, the grey hierarchical evaluating method is used to evaluate the performance of the fault diagnosis methods in the fighter plane's control surface damage. The experimental research shows that the grey hierarchical evaluating method is a reliable and efficient method in the evaluation of the fault diagnostic methods in the dynamic systems.

**Key words** dynamic systems, fault diagnosis, grey system theory, the analytic hierarchical process, evaluation

## 0 引言

动态系统故障诊断方法的评估是一个多目标多层次的综合评判问题, 目前常用的评估方法有综合指数评判法、模糊综合评判法等. 这些方法应用较多, 但也存在着许多不足, 例如模糊综合评价法是当前评估工作中广为应用的一种方法. 但是由于模糊综合评价法是一种间接法, 为了求出各因素的隶属函数, 必须把各项指标值进行特征化处理, 致使有些指标本属白化的数值, 经特征化处理后, 反

而变成一个区间的模糊值而不同程度地丢失了信息, 给评价带来误差, 甚至会出现错误<sup>[1]</sup>. 灰色系统理论对于过程复杂, 难以从定量角度建立精确模型的系统研究具有广泛的适应性. 特别是在系统信息数据量少和条件不满足一般统计学要求的情况下更具有实用价值.

自从灰色系统理论问世以来, 已有许多文献将灰色系统理论中的灰关联度分析方法用于评估系统方案的优劣<sup>[1, 3~5]</sup>, 并得到了令人满意的结果. 灰关联度分析法已经被证明对多目标多层次的综合

收稿日期: 2004-06-02

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60234010)和国防基础科研资助项目(K16030318).

作者简介: 张震(1973-), 硕士研究生, 主要从事计算机可靠性控制等方面的学习与研究. E-mail: zacharyzhang@tom.com

通讯联系人: 胡寿松(1937-), 教授, 博士生导师, 主要从事故障诊断、自适应及自修复控制以及鲁棒控制等方面的教学与研究.

E-mail: hushou.song-nuaa@163.com

决策问题是一种简单而准确的解决办法,它不要求数据满足一定的统计概率密度,需要的数据量也不大<sup>[2]</sup>。所以本文利用灰关联度分析法,结合层次分析法,建立了动态系统故障诊断方法的综合评估模型。它是一种直接法,可以充分利用已有的白化信息,吸收各类底层指标信息,从而得到较准确、客观的综合评估结果。

## 1 灰色层次评估法的基本原理

### 1.1 确定指标体系和组合权重

(1) 对评估对象进行深入研究,应用层次分析法,对评估对象的评估指标进行逐层分解,使同层次指标之间的含义互不交叉,相邻上下层指标之间为“父子”关系,建立评估对象的递阶层次结构的指标体系。

(2) 根据简易表格法,由专家或评估者对上下层指标之间的关系进行定性填表,用和积法计算相邻层次下层指标对于上层指标的相对权重,从而得到底层指标对于综合指标的组合权重:

$$W = (w_1, w_2 \dots w_m)^T$$

### 1.2 构造评估指标值矩阵

假设有  $n$  个待评估对象,评估指标体系由  $m$  个评估指标组成,其中定性指标  $p$  个,定量指标  $q$  个 ( $p + q = m$ )。则评估指标值矩阵为  $m \times n$  阶矩阵  $X = (x_{ij})_{m \times n}$ , 式中  $x_{ij}$  为第  $j$  个待评估对象在第  $i$  个评估指标下的指标特征值,其中定性指标按下面的方法进行量化<sup>[1]</sup>。

(1) 制定定性指标的评分等级标准。一般可以将指标等级划分为 7 级,其中“优”、“良”、“中”、“差”对应分值分别为 4 3 2 1, 指标等级介于两相邻等级之间时,其相应评分值为 3.5 2.5 和 1.5

(2) 组织专家或评估者进行评分并给出评估样本矩阵。设有  $k$  个评估者,根据第  $j$  个评估者对第  $s$  个待评估对象的第  $i$  个指标给出的评分  $d_{ij}^{(s)}$ , 求出第  $s$  个待评估对象的评估样本矩阵  $(d_{ij}^{(s)})_{p \times k}$ , 其中,  $i = 1, 2, \dots, p$   $j = 1, 2, \dots, k$

(3) 确定评估灰类。设评估灰类序号为  $e$ , 其相应灰数及白化权函数如下:

第 1 灰类“优” ( $e = 1$ ), 设定灰数  $\otimes_1 \in [4, \infty)$ , 白化权函数  $f_1$  的表达式为:

$$f_1(d_{ij}^{(s)}) = \begin{cases} \frac{d_{ij}^{(s)}}{4} & d_{ij}^{(s)} \in [0, 4] \\ 1 & d_{ij}^{(s)} \in (4, \infty) \\ 0 & d_{ij}^{(s)} \in (-\infty, 0) \end{cases}$$

第 2 灰类“良” ( $e = 2$ ), 设定灰数  $\otimes_2 \in [0, 3, 6]$ , 白化权函数  $f_2$  的表达式为:

$$f_2(d_{ij}^{(s)}) = \begin{cases} \frac{d_{ij}^{(s)}}{3} & d_{ij}^{(s)} \in [0, 3] \\ 2 - \frac{d_{ij}^{(s)}}{3} & d_{ij}^{(s)} \in (3, 6] \\ 0 & d_{ij}^{(s)} \notin [0, 6] \end{cases}$$

第 3 灰类“中” ( $e = 3$ ), 设定灰数  $\otimes_3 \in [0, 2, 4]$ , 白化权函数  $f_3$  的表达式为:

$$f_3(d_{ij}^{(s)}) = \begin{cases} \frac{d_{ij}^{(s)}}{2} & d_{ij}^{(s)} \in [0, 2] \\ 2 - \frac{d_{ij}^{(s)}}{2} & d_{ij}^{(s)} \in (2, 4] \\ 0 & d_{ij}^{(s)} \notin [0, 4] \end{cases}$$

第 4 灰类“差” ( $e = 4$ ), 设定灰数  $\otimes_4 \in [0, 1, 2]$ , 白化权函数  $f_4$  的表达式为:

$$f_4(d_{ij}^{(s)}) = \begin{cases} 1 & d_{ij}^{(s)} \in [0, 1] \\ 2 - d_{ij}^{(s)} & d_{ij}^{(s)} \in (1, 2] \\ 0 & d_{ij}^{(s)} \notin [0, 2] \end{cases}$$

(4) 计算灰色评估系数。第  $s$  个待评估对象属于第  $e$  个灰类的灰色评估系数记为  $n_{ie}^{(s)}$ , 属于各个评估灰类的总灰色评估系数记为  $n_i^{(s)}$ , 则有:

$$n_{ie}^{(s)} = \sum_{j=1}^k f_e(d_{ij}^{(s)}) \quad n_i^{(s)} = \sum_{e=1}^4 n_{ie}^{(s)}$$

(5) 计算灰色评估权矩阵。第  $s$  个待评估对象,对第  $i$  个评估指标属于第  $e$  个灰类的灰色评估权向量记为  $r_{ie}^{(s)}$ , 则有  $r_{ie}^{(s)} = \frac{n_{ie}^{(s)}}{n_i^{(s)}}$ ,

从而得到第  $s$  个待评估对象对所有定性评估指标的灰色评估权矩阵  $R^{(s)} = (r_{ie}^{(s)})_{p \times 4}$ 。

(6) 计算定性评估指标特征值向量。设各评估灰类等级分值向量  $c = (4, 3, 2, 1)$ , 于是第  $s$  个待评估对象的定性指标特征值向量  $F = R^{(s)} \times C^T$ 。

### 1.3 指标特征值规范化处理

一般情况下,待评估对象的不同类型指标间的量纲不同,数量差异较大,使得不同指标间在量上不能进行比较,故必须对由定性和定量指标组成的指标特征值矩阵  $X = (x_{ij})_{m \times n}$  进行规范化处理。(在进行规范化处理时,对特殊数据要剔除,否则将得不到正确结果。例如某一项指标不具备时,得到的评分是 0 分,但是在规范化处理时,选取最小值就需要忽略 0 值,否则得到的结果可能不准确。)指标特征值的规范化处理可以按下面方法进行<sup>[3]</sup>。

越小越优型(例如成本、亏损等):

$$r_{ij} = \left( \max_i x_{ij} - x_{ij} \right) / \left( \max_i x_{ij} - \min_i x_{ij} \right);$$

越大越优型指标(例如收益等):

$$r_{ij} = \left( x_{ij} - \min_i x_{ij} \right) / \left( \max_i x_{ij} - \min_i x_{ij} \right)$$

固定型指标(越接近某一标准值 $x_0$ 越优,例如年龄等):

$$r_{ij} = \left( |x_{ij} - x_0| \right) / \left( \max_i (x_{ij} - x_0) \right).$$

其中,  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $j = 1, 2, \dots, n$ . 于是, 得到规范化指标特征值矩阵  $R = (r_{ij})_{m \times n}$ .

### 1.4 灰关联度分析

首先, 求出系统的最优方案和最劣方案.

最优方案向量为  $G = (g_1, g_2, \dots, g_n) = (r_{11} \vee r_{21} \vee \dots \vee r_{m1}, r_{12} \vee r_{22} \vee \dots \vee r_{m2}, \dots, r_{1n} \vee r_{2n} \vee \dots \vee r_{mn})$ ;

最劣方案向量为  $B = (b_1, b_2, \dots, b_n) = (r_{11} \wedge r_{21} \wedge \dots \wedge r_{m1}, r_{12} \wedge r_{22} \wedge \dots \wedge r_{m2}, \dots, r_{1n} \wedge r_{2n} \wedge \dots \wedge r_{mn})$ ;

其中“ $\vee$ ”和“ $\wedge$ ”分别为取大和取小运算符, 记第  $j$  个方案向量为  $X_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}) \quad j = 1, 2, \dots, n$

其次, 利用下面的灰关联系数公式<sup>[4]</sup>, 求第  $j$  个方案向量  $X_j$  与最优方案向量  $G$  的关联系数  $\zeta(X_j, G)$ :

$$\zeta(X_j, G) = \frac{\min_k \Delta_j(k) + \rho \max_k \Delta_j(k)}{\Delta_j(k) + \rho \max_k \Delta_j(k)}$$

其中,  $\Delta_j(k) = |g_{jk} - x_{jk}| \quad k = 1, 2, \dots, m$ . 分辨系数  $\rho$  是  $0 \sim 1$  之间的数, 一般可以取为  $0.5$

第  $j$  个方案向量  $X_j$  与最劣方案向量  $B$  的关联系数  $\zeta(X_j, B)$ :

$$\zeta(X_j, B) = \frac{\min_k \Delta_j(k) + \rho \max_k \Delta_j(k)}{\Delta_j(k) + \rho \max_k \Delta_j(k)}$$

其中,  $\Delta_j(k) = |b_{jk} - x_{jk}| \quad k = 1, 2, \dots, m$ . 分辨系数  $\rho$  是  $0 \sim 1$  之间的数, 一般可以取为  $0.5$

最后, 利用层次分析法得到的组合权重  $W$  和关联系数, 计算加权灰关联度.

$X_j$  与最优方案向量  $G$  的灰关联度:

$$D(X_j, G) = W^T \zeta(X_j, G).$$

$X_j$  与最劣方案向量  $B$  的灰关联度:

$$D(X_j, B) = W^T \zeta(X_j, B).$$

### 1.5 综合评估

假如第  $j$  个方案向量  $X_j$  以  $V_j$  从属于最优方案向量  $G$ , 那末  $X_j$  以  $(1 - V_j)$  从属于最劣方案向量  $B$ , 则称  $(1 - V_j)$  为第  $j$  个方案向量  $X_j$  偏离于最优

方案向量  $G$  的优偏离度,  $V_j$  为第  $j$  个方案向量  $X_j$  偏离于最劣方案向量  $B$  的劣偏离度<sup>[1]</sup>. 根据最优原理, 给出性能指标函数

$$\min \{ F(V) = \sum_{j=1}^M [(1 - V_j) D(X_j, G)]^2 + [V D(X_j, B)]^2 \}$$

求解  $\frac{dF(v_1, v_2, \dots, v_n)}{dv_j} = 0$  得到  $V_j$  最优值的计算模型为<sup>[1]</sup>:

$$V_j = \frac{1}{1 + [D(X_j, B) / D(X_j, G)]^2}$$

其中,  $j = 1, 2, \dots, n$ .

该模型具有明确的物理意义.

1)  $V_j > 0.5$  表明  $X_j$  从属于最优方案的程度大于从属于最劣方案的程度;  $V_j < 0.5$  其物理意义相反.

2)  $V_j = 0.5$  表明  $X_j$  从属于最优方案的程度与从属于最劣方案的程度相等.

3)  $V_j = 1$ , 表明  $X_j$  必定为最优方案;  $V_j = 0$  其物理意义相反.

4)  $V_j$  越大, 表明第  $j$  个方案  $X_j$  的性能越好;  $V_j$  越小, 表明第  $j$  个方案  $X_j$  的性能越差.

因此, 根据  $V_j$  的大小不同排出各待评估对象的优劣次序, 即可得到综合评估结果.

## 2 评估实例研究

本文参考文献[6]中的实例, 对歼击机操纵面损伤故障的3种诊断方法, 即检测滤波器故障诊断方法、基于粗集模型的故障诊断方法、粗集神经网络故障诊断方法, 应用灰色层次评估法进行评估实例的研究.

### 2.1 确定指标体系和组合权重

选取如下指标作为歼击机故障诊断方法的评估指标, 并将其整理为4大类: 检测性能指标、诊断性能指标、鲁棒性指标、综合性能指标, 构成如图1所示的评估指标体系.

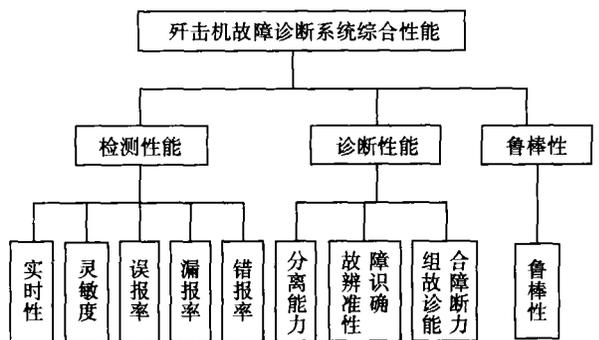


图1 歼击机结构故障诊断指标体系

采用两两比较法比较底层评估指标, 得到相应的判断矩阵  $A_1, A_2, A_3, A_4$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 2 \\ 1 & 1 & 0 & 2 \\ 5 & 5 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 25 & 0 & 25 & 0 & 25 \\ 0 & 5 & 4 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 5 & 4 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 5 & 4 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 \\ 0 & 5 & 0 & 5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = 1$$

下面利用和积法计算指标对于相应上层指标的相对权重. 具体计算步骤如下:

将判断矩阵每一列进行正规化处理.

$$b_{kj} = a_{ij} \div \sum_{k=1}^n a_{ik} \quad i, j, k = 1, 2, \dots, n$$

把经过正规化处理的判断矩阵按行相加.

$$w_j = \sum_{i=1}^n b_{ij} \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

再对向量  $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$  进行正规化处理.

$$w_i = w_j \div \sum_{j=1}^n w_j \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

所得到的  $w_1, w_2, \dots, w_n$  就是该指标对于相应上层指标的相对权重. 利用判断矩阵  $A_1, A_2, A_3, A_4$  计算得到  $w_1 = (0.1429, 0.1429, 0.7142)^T$ ,  $w_2 = (0.3582, 0.0545, 0.1958, 0.1958, 0.1958)^T$ ,  $w_3 = (0.4, 0.4, 0.2)^T$ ,  $w_4 = 1$  其中  $w_1$  是中间层指标对于目标  $E$  的相对权重,  $w_2, w_3, w_4$  分别是底层指标对于中间层指标  $A, B, C$  的相对权重. 所以得到底层指标对于目标  $E$  的组合权重 (组合排序) 为

$$W = \begin{bmatrix} w_2 & \mathbf{0}_{5 \times 1} & \mathbf{0}_{5 \times 1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} & w_3 & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & w_4 \end{bmatrix} \times w_1 = [0.0512, 0.0078, 0.0280, 0.0280, 0.0280, 0.0572, 0.0572, 0.0286, 0.7142]^T$$

### 2.2 构造评估指标值矩阵

对实例中给出的定性指标值利用三角白化函数进行量化处理, 得到待评估对象的指标特征值矩阵  $F$ .

### 2.3 指标特征值规范化处理

对指标特征值矩阵规范化处理后得到  $R$ .

### 2.4 灰关联度分析

最优方案向量为  $G = [1, 1, 1]$ ; 最劣方案向量为  $B = [0, 0, 0]$ .

利用层次分析法得到的组合权重  $W$  和关联系数, 计算加权灰关联度.

3 个待评估对象与最优方案  $G$  的加权灰关联度  $DG = [0.5184, 0.4364, 0.9609]$ ,

3 个待评估对象与最劣方案  $B$  的加权灰关联度  $DB = [0.8103, 0.8600, 0.3727]$ .

### 2.5 综合评估

由  $V_j$  最优值的计算模型解得:

$$V = [0.2904, 0.2048, 0.8692]$$

显然, 第三种故障诊断方法粗集神经网络故障诊断方法的性能最好, 其次为第一种检测滤波器故障诊断方法, 最差是第二种基于粗集模型的故障诊断方法. 该结果与专家的定性分析结果是一致的.

## 3 结束语

动态系统故障诊断方法的评估不仅具有多目标、多层次、多关联等属性, 而且具有信息不完备的特点. 本文运用灰色系统理论, 建立了灰色层次分析模型. 该模型能在短资料、少信息条件下建模和评估. 评估结果既能对被评估对象的整体性能进行综合评价, 又能展现被评估对象各个评估指标的优劣状况, 便于今后的改进. 最后引用实例加以验证, 取得了明显的效果.

### [参考文献]

[1] 邹珊刚, 唐炎钊. 投资项目的灰色综合评价及应用 [J]. 华中理工大学学报(自然科学版), 1999, 27(7): 92-94

[2] Wang Z, Gao Y, Qin P. Detection of gross measurement errors using the grey system method [J]. Int J Adv Manuf Technol 2002, 19(11): 801-804

[3] Tsai Chihlung, Chang Chingliang, Chen Lieh. Applying grey relational analysis to the vendor evaluation model [J]. The Internet and Management 2003, 11(3): 45-53

[4] Wang C H, Tong L I. Quality improvement for dynamic ordered categorical response using grey relational analysis [J]. Int J Adv Manuf Technol 2003, 21(5): 377-383

[5] Wang C C L, Chen S F, Yuen M M F. Fuzzy part family formation based on grey relational analysis [J]. Int J Adv Manuf Technol 2001, 18(2): 128-132

[6] 胡寿松, 徐德友, 刘亚. 动态系统故障诊断方法的评估 [J]. 华北电力大学学报, 2003, 30(6): 20-24

[责任编辑: 刘健]