

文章编号: 1000 8055(2008)09 1724 07

卫星动量轮轴承组件的仿真可信度评估

刘秀海¹, 邓四二^{1,2}, 滕弘飞^{1,3}

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 大连 116024;

2. 河南科技大学 机电工程学院, 洛阳 471003;

3. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024)

摘 要: 研究了某一卫星的动量轮轴承组件仿真的可信度评估, 基于仿真系统与物理试验系统的相似度与仿真可信度之间的关系, 采用计算仿真与物理试验输出的相似度评估仿真可信度. 确定了动量轮轴承组件仿真与试验输出的相似元, 构建了量化其相似系数的函数. 对于基于三角模糊数的层次分析法确定各要素影响权重的计算进行了改进. 最后应用该方法对某一卫星动量轮轴承组件实例的可信度进行了度量.

关 键 词: 轴承组件; 可信度; 相似度; 仿真; 三角模糊数; 层次分析法

中图分类号: V 448 22; TP391 3

文献标识码: A

Simulation credibility evaluation of the momentum wheel bearing subassembly in the satellite

LIU Xiu hai¹, DENG Si er^{1,2}, TENG Hong fei^{1,3}

(1. School of Mechanical Engineering,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Mechatronics Engineering,

Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

3. Key Laboratory for Precision and Nontraditional Machining of Ministry of Education,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The paper discussed the credibility evaluation of the momentum wheel bearing subassembly in a satellite. The simulation credibility evaluation was conducted by calculating the similarity between the simulation output and physical experimental output, which was based on the relationship between the credibility and the similarity. Similarity elements between simulation output and physical experimental output were determined, and a quantitative function was constructed. Then, the paper improved the computational methods of analytic hierarchy process (AHP) that was used to determine the weight of elements. Consequently, the simulation credibility of a momentum wheel bearing subassembly was evaluated through the method.

Key words: bearing subassembly; credibility; similarity; simulation;
triangular fuzzy numbers; analytic hierarchy process (AHP)

收稿日期: 2007 09 12; 修订日期: 2008 03 12

基金项目: 国家自然科学基金(50575031); 国家“十一五”科技攻关项目(JPPT-115 189)

作者简介: 刘秀海(1981-), 男, 山东曲阜人, 博士生, 主要从事滚动轴承动力学理论与仿真研究. E-mail: tenghf@dlut.edu.cn

动量轮轴承组件是卫星姿态控制的关键执行部件,其工作动态性能及可靠性直接影响到卫星的控制精度与寿命。在轴承组件设计阶段需对其动态性能进行评价,一般采用仿真系统,仿真系统的高可信性是保证评价准确性的前提。仿真系统必须通过校核、验证和确认(Verification, validation, and accreditation, 简称 VV&A),才能保证仿真的可信度,许多学者对仿真系统的 VV&A 的内容、方法及过程做了研究^[1-2]。在仿真可信度评估过程中常存在如何客观地、量化地评价系统可信度的问题。许多学者在不同领域做了相关研究^[3-5]。本文主要对卫星动量轮轴承组件仿真的可信度进行评估,通过计算仿真系统与物理试验系统的相似度计算确定仿真的可信度值。重点研究了卫星动量轮轴承组件仿真与物理试验输出的相似元及相似系数确定函数,对计算系统相似度中各要素权重的计算方法——基于三角模糊数的互反型模糊层次分析法进行了改进。通过实例计算证明其工程实用性。

1 可信度、置信度及相似度

仿真系统可信度是指仿真系统作为原形系统的相似替代,在总体结构和行为水平上能够复现原形系统的可信性程度^[5]。仿真置信度,是一种仿真可信性的度量,指在一定的预期要求下仿真真实性可接收的程度度量,其大小与预期即置信区间有关的。系统相似度是刻画系统间相似性程度的度量。根据相似理论可知,当模拟仿真系统与原型系统的相似程度越接近,模拟仿真系统再现性就越好,即可信度就越高^[6]。因此可以通过计算仿真系统与原型系统的相似度来确定仿真系统的可信度。假设仿真系统可信度为 F , 系统相似度为 Q , 则有 $F \propto Q$ 。判断模型及其仿真结果是否正确,一般是通过对模型仿真与物理试验数据的比较,考察两种结果的一致性来实现^[7]。输入条件相同时,由于仿真模型的序结构、支配规律等与物理试验系统的相同,则可以直接通过验证仿真系统的输出与物理试验系统的输出之间的相似度来确定仿真系统的可信度。

2 相似度计算

相似系统间如存在一个相似要素或一个相似特性,便在系统间构成一个相似单元(简称相似元)。设系统 A 由 k 个特征要素构成,系统 B 由 l 个特征要素构成,系统 A 和 B 的特征相似要素有

n 个,每个相似要素相似程度的特征相似元值为 $q(u_i)$,相似要素对系统相似度的影响权重为 d_i ,则系统的相似度 $Q(A, B)$ 为^[6]

$$Q(A, B) = f[k, l, n, q(u_i), d_i] = \frac{n}{k + l - n} \sum_{i=1}^n d_i q(u_i),$$

$$1 \leq n \leq \min(k, l) \quad (1)$$

由于卫星动量轮轴承组件仿真的输出与物理试验的输出的特征要素及相似的数量是相同的,所以上述可以简化为

$$Q(A, B) = f[q(u_i), d_i] = \sum_{i=1}^n d_i q(u_i) \quad (2)$$

2.1 特征相似元量化计算

相似元一般应选取反映主要性能指标作为要素,而且相似元之间应相互独立。对于卫星动量轮轴承组件仿真与物理试验的相似元的选取,由于要同时获得仿真输出与物理试验输出,则还要考虑物理试验的可实现行性问题。对于卫星用动量轮轴承组件,其动态性能及温度场是主要考察的指标,所以选择动态性能中具有代表性的指标固有频率和动态响应功率谱密度最大频率及温度场作为评价指标。

这些指标的仿真输出集合 S 的要素 s_i 与对应的物理试验输出集合 R 的要素 r_i 构成相似元 $u(s_i, r_i)$, 简记为 u_i 。而相似元集合记为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。求取相似元的相似系数即相似值 $q(u_i)$ 可采用的方法不是唯一的。根据仿真系统可信度验证的特点,在物理试验数据正确的前提下,特征要素的相似度计算以物理试验数据为基准,当仿真数据趋近物理试验数据时,两者相似度趋于 1,当仿真数据愈偏离物理试验数据,两者的相似度愈趋于 0,且变化趋势类似正态分布的特点,现构造下面的函数进行相似值的计算方法

$$q(u_i) = \exp(-|s_i/r_i - 1|) \quad (3)$$

式中 s_i 为仿真输出的要素特征值; r_i 为物理试验输出的要素特征值。

2.2 特征权重系数确定

对于卫星动量轮轴承组件,不同部位或不同情况下的参数输出的重要性是不同的,其对可信度的影响是不同的,要准确的确定卫星动量轮轴承组件仿真的可信度,就必须准确的量化各要素的权重。层次分析法(Analytic hierarchy process, 简称 AHP)是定性评价及权值确定的常用方法。但传统的 AHP 存在一些不足之处,许多学者对

其进行了改进研究. 本文采用基于三角模糊数的互反型 AHP 方法进行计算, 在前人研究的基础上对其计算权重的方法进行了改进. 本文按照层次分析法的原理求解各要素的模糊权重, 然后进行去模糊化的方法对权重进行求解. 权值确定步骤如下:

1) 构造成对比较模糊判断矩阵

针对专家在构造比较判断矩阵时的主观判断不确定性问题引入三角模糊数构造模糊比较判断矩阵. 本文采用互反型 AHP, 相对互补型 AHP 它能唯一的确定权值. 把动量轴承组件仿真与试验输出构成的相似元集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 作为评价因素, 用三角模糊数 $\tilde{u}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, n_{ij})$ 来表示评价因素 u_i 和 u_j 间两两重要性比较结果, $l_{ij}, m_{ij}, n_{ij} \in S = (1/9, 1/8, \dots, 1/2, 1, 2, \dots, 9)$ 遵循 1~9 标度(标度含义见表 1), $l_{ij} \leq m_{ij} \leq n_{ij}$, 左右扩展 l_{ij} 和 n_{ij} 表示判断的模糊程度.

表 1 l_{ij}, m_{ij}, n_{ij} 的标度及其含义

Table1 Scale meaning of l_{ij}, m_{ij}, n_{ij}

标度	定义
1	相似元 u_i 与 u_j 同等重要
3	相似元 u_i 比 u_j 稍微重要
5	相似元 u_i 比 u_j 明显重要
7	相似元 u_i 比 u_j 强烈重要
9	相似元 u_i 比 u_j 极端重要
2, 4, 6, 8	介于上面标度之间时取值
1/2, 1/3, ..., 1/9	相似元 u_j 比 u_i 的重要性程度, $u_{ji} = u_{ij}^{-1}$

u_i 和 u_j 间两两比较得到正互反型三角模糊判断矩阵 $\tilde{P}$

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{11} & \tilde{u}_{12} & \dots & \tilde{u}_{1j} & \dots & \tilde{u}_{1n} \\ \tilde{u}_{21} & \tilde{u}_{22} & \dots & \tilde{u}_{2j} & \dots & \tilde{u}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{u}_{i1} & \tilde{u}_{i2} & \dots & \tilde{u}_{ij} & \dots & \tilde{u}_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{u}_{n1} & \tilde{u}_{n2} & \dots & \tilde{u}_{nj} & \dots & \tilde{u}_{nn} \end{bmatrix} = [\tilde{u}_{ij}]_{n \times n} \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{ji} &= (\tilde{u}_{ij})^{-1} = (n_{ij}^{-1}, m_{ij}^{-1}, l_{ij}^{-1}), \\ \tilde{u}_{ii} &= (1, 1, 1) \end{aligned}$$

2) 判断矩阵一致性检验

在应用层次分析法时, 为了保证导出权重值的准确性, 必须对判断矩阵进行一致性检验. 对三角模糊比较矩阵 $\tilde{P} [u_{ij}]_{n \times n}$ 为一致性模糊判断矩阵的充要条件是 $P [m_{ij}]_{n \times n}$ 为一致性判断矩阵^[8,9]. 当一致性比率 $CR = CI/RI < 0.1$ (CI 为一致性指标 $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$, $\lambda_{\max}$ 为比较矩阵的最大特征值, n 为矩阵阶数, RI 为随机一致性指标)时, 认为矩阵的不一致程度在容许范围之内, 可用其归一化特征向量作为权向量.

如模糊判断矩阵不满足一致性要求则对其进行反馈调整直到满足一致性要求.

3) 计算权重

对于基于三角模糊数的层次分析法确定权值, 一般采用比较模糊数可能性程度的方法确定权重, 但这有可能在某指标“绝对”小于其它指标时^[10], 其权值为零, 权值确定失效. 为此采用以下方法计算.

对 P 的每一列三角模糊数进行正规化

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{ij}' &= \tilde{u}_{ij} \odot \left(\sum_{k=1}^n \tilde{u}_{kj} \right)^{-1} = \\ &= \left(\frac{l_{ij}}{\sum_{k=1}^n l_{kj}}, \frac{m_{ij}}{\sum_{k=1}^n m_{kj}}, \frac{n_{ij}}{\sum_{k=1}^n n_{kj}} \right) \quad (5) \\ \text{当 } \frac{l_{ij}}{\sum_{k=1}^n l_{kj}}, \frac{m_{ij}}{\sum_{k=1}^n m_{kj}}, \frac{n_{ij}}{\sum_{k=1}^n n_{kj}} > 1 \text{ 时取为 } 1. \end{aligned}$$

归一化后得到矩阵 $\tilde{P}' = [\tilde{u}_{ij}']_{n \times n}$, 再对 $\tilde{P}'$ 的每一行进行加运算

$$\begin{aligned} \tilde{u}_i'' &= \sum_{k=1}^n \tilde{u}_{ik}' = (l_i'', m_i'', n_i''), \\ i &= 1, 2, 3, \dots, n \quad (6) \end{aligned}$$

得列向量

$$\tilde{W} = [\tilde{u}_1'', \tilde{u}_2'', \dots, \tilde{u}_n'']^T \quad (7)$$

运用质心法对 $\tilde{u}_i''$ 去模糊化^[11]得

$$\begin{aligned} x_i^{\text{def}} &= \int_{l_i}^{n_i} x \mu_{\tilde{u}_i''}(x) dx \bigg/ \int_{l_i}^{n_i} \mu_{\tilde{u}_i''}(x) dx = \\ &= (l_i + m_i + n_i)/3 \quad (8) \end{aligned}$$

式中 x_i^{def} 为三角模糊数 $\tilde{u}_i''$ 去模糊化的准确值; $\mu_{\tilde{u}_i''}(x)$ 为 $\tilde{u}_i''$ 的隶属度函数

$$\mu_{\tilde{u}_i''}(x) = \begin{cases} \frac{x - l_i}{m_i - l_i} & l_i \leq x \leq m_i \\ \frac{n_i - x}{n_i - m_i} & m_i \leq x \leq n_i \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

对 x_i^{def} 归一化后, 得到各元素的的权重向量

$$\omega = [d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_n]^T \tag{10}$$

式中

$$d_i = x_i^{\text{def}} \bigg/ \sum_{k=1}^n x_k^{\text{def}} \tag{11}$$

2.3 多层系统相似度

对于卫星动量轮轴承组件仿真系统一般有多级子系统和要素构成, 即为多层次结构. 对于多层次系统的的相似度可以按照图 1 所示进行计算, 由底层递推计算高一层次的相似度, 最终得到整个系统的相似度.

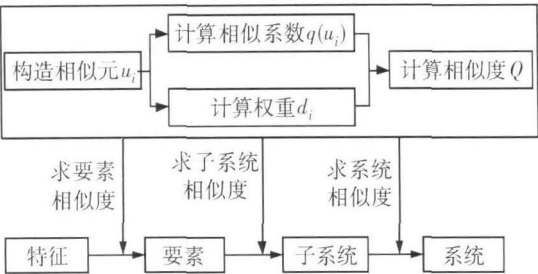


图 1 系统相似度的计算过程

Fig.1 Calculation process of similarity between two systems

3 动量轮轴承组件仿真可信度计算算例

某卫星动量轮轴承组件(见图 2) 的仿真分析包括组件的温度场分析、各零件固有频率仿真计算和组件的动态响应频率分析(见图 3). 固有频率计算主要对保持架、外圈、压盖、支承轴、轴承座

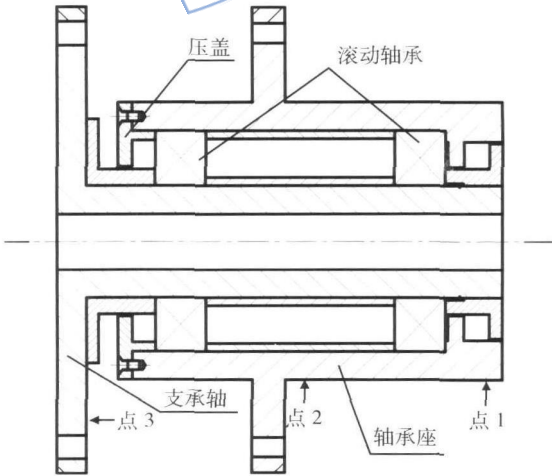


图 2 卫星动量轮轴承组件示意图

Fig.2 Sketch of the momentum wheel bearing subassembly in a satellite

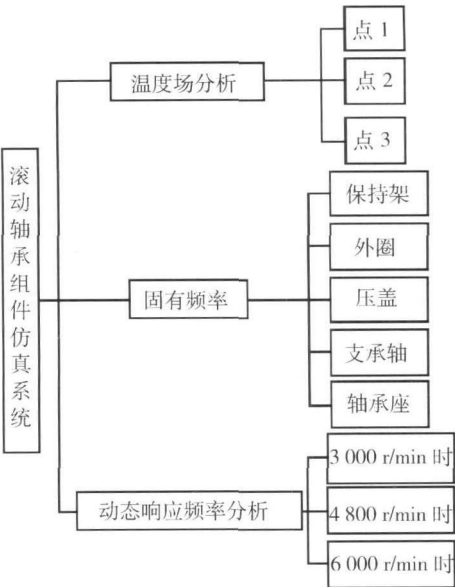


图 3 滚动轴承组件仿真系统的结构层次

Fig.3 Hierarchy of the simulation system of the rolling bearing subassembly

的固有频率进行计算. 组件的温度场分析是对轴承组件内 3 个点(点 1, 点 2, 点 3, 见图 2) 进行计算测量. 动态响应频率分析部分主要分析的是不同转速(3 000 r/min, 4 800 r/min, 6 000 r/min) 下动态响应时功率谱密度最大的频率. 滚动轴承组件仿真与试验结果见表 2~ 表 4.

表 2 温度场分析仿真、试验数据及相似值

Table 2 Simulative and experimental data of temperature field and similarity value

	点 1	点 2	点 3
仿真/℃	28.44	27.77	23.55
试验/℃	27.5	27.1	23.0
相似值	0.966 2	0.974 1	0.975 4

表 3 零件固有频率仿真、试验数据及相似值

Table 3 Simulative and experimental data of natural frequency and similarity value

	保持架	外圈	压盖	支承轴	轴承座
仿真/Hz	1 331.2	5 243.2	4 673.9	2 804.1	7 478.0
试验/Hz	1 359.5	5 189.7	5 046.9	2 967.5	7 583.9
相似值	0.979 4	0.989 7	0.928 7	0.946 4	0.986 1

根据前述, 把各仿真和试验的数据作为相似元, 按公式(3) 计算得到相似值(见表 2~ 表 4).

表 4 动态响应频率分析仿真、试验数据及相似值

Table 4 Simulative and experimental data of dynamic response frequency and similarity value

	3 000 r/min	4 800 r/min	6 000 r/min
仿真/ Hz	4 033. 8	4 206. 4	4 087. 9
试验/ Hz	3 981. 3	3 945. 7	3 927. 9
相似值	0. 986 9	0. 936 1	0. 960 1

3 1 温度场仿真与试验的相似度

点 1、点 2 和点 3 温度成对模糊比较矩阵为

$$\tilde{P}_{\text{温度}} = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & (2, 2, 3) & (2, 3, 4) \\ (1/3, 1/2, 1/2) & (1, 1, 1) & (1, 2, 3) \\ (1/4, 1/3, 1/2) & (1/3, 1/2, 1) & (1, 1, 1) \end{bmatrix}$$

$$\tilde{P}_{\text{固频}} = \begin{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} (1, 1, 1) \\ \frac{1}{2}, 1, 1 \end{matrix} \right\} & (1, 1, 2) & (3, 4, 5) & (1, 2, 3) & (2, 3, 3) \\ \left\{ \begin{matrix} \frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3} \end{matrix} \right\} & \left\{ \begin{matrix} \frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2} \end{matrix} \right\} & (2, 3, 4) & (1, 2, 3) & (1, 2, 3) \\ \left\{ \begin{matrix} \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1 \end{matrix} \right\} & \left\{ \begin{matrix} \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1 \end{matrix} \right\} & (1, 1, 1) & \left\{ \begin{matrix} \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \end{matrix} \right\} & \left\{ \begin{matrix} \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2} \end{matrix} \right\} \\ \left\{ \begin{matrix} \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2} \end{matrix} \right\} & \left\{ \begin{matrix} \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1 \end{matrix} \right\} & (2, 2, 3) & (1, 1, 1) & (1, 2, 2) \\ (2, 3, 3) & \left\{ \begin{matrix} \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1 \end{matrix} \right\} & (2, 3, 3) & \left\{ \begin{matrix} \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1 \end{matrix} \right\} & (1, 1, 1) \end{bmatrix}$$

判断一致性矩阵为

$$P_{\text{固频}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 4 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 3 & 2 & 2 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 2 & 1 & 2 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 3 & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

$P_{\text{固频}}$ 的最大特征值为 $\lambda_{\max} = 5.132\ 5$, 阶数 $n = 5$, 则 $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = 0.033\ 1$, $RI = 1.12$, 因此 $CR = CI / RI = 0.029\ 6 < 0.1$, 则 $\tilde{P}_{\text{固频}}$ 的一致性可以接受.

按公式 (5) 对 $\tilde{P}_{\text{固频}}$ 的每一列三角模糊数进行归一化得

$$\tilde{P}_{\text{固频}} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} \end{bmatrix}$$

式中

$$P_{11} = (0.260\ 9, 0.324\ 3, 0.422\ 5)$$
$$P_{12} = (0.181\ 8, 0.3, 0.685\ 7)$$

可验证其判断一致性的矩阵 $P_{\text{温度}}$ 的一致性

比率 $CR = 0.007\ 9 < 0.1$, 所以 $\tilde{P}_{\text{温度}}$ 的一致性可以接受.

最终计算得点 1、点 2 和点 3 温度的权重向量为

$$\omega_{\text{温度}} = [0.545\ 0, 0.282\ 8, 0.172\ 2]^T$$

温度场的仿真与试验相似度为

$$Q_{\text{温度}} = (0.966\ 2, 0.974\ 1, 0.975\ 4)$$
$$\omega_{\text{温度}} = 0.970\ 0$$

3 2 零件固有频率仿真与试验的相似度

保持架、外圈、压盖、支承轴、轴承座固有频率的成对模糊比较矩阵为

$$P_{13} = (0.187\ 5, 0.307\ 7, 0.5)$$
$$P_{14} = (0.117\ 6, 0.333\ 3, 0.782\ 6)$$
$$P_{15} = (0.210\ 5, 0.36, 0.562\ 5)$$
$$P_{21} = (0.130\ 4, 0.324\ 3, 0.422\ 5)$$
$$P_{22} = (0.181\ 8, 0.3, 0.342\ 9)$$
$$P_{23} = (0.12\ 5, 0.230\ 8, 0.4)$$
$$P_{24} = (0.117\ 6, 0.333\ 3, 0.782\ 6)$$
$$P_{25} = (0.105\ 3, 0.24, 0.562\ 5)$$
$$P_{31} = (0.052\ 2, 0.081\ 1, 0.140\ 8)$$
$$P_{32} = (0.045\ 5, 0.1, 0.171\ 4)$$
$$P_{33} = (0.062\ 5, 0.076\ 9, 0.1)$$
$$P_{34} = (0.039\ 2, 0.083\ 3, 0.130\ 4)$$
$$P_{35} = (0.035\ 1, 0.04, 0.093\ 8)$$
$$P_{41} = (0.087, 0.162\ 2, 0.422\ 5)$$
$$P_{42} = (0.060\ 6, 0.15, 0.342\ 9)$$
$$P_{43} = (0.125, 0.153\ 8, 0.3)$$
$$P_{44} = (0.117\ 6, 0.166\ 7, 0.260\ 9)$$
$$P_{45} = (0.105\ 3, 0.24, 0.37\ 5)$$
$$P_{51} = (0.087, 0.108\ 1, 0.211\ 3)$$
$$P_{52} = (0.060\ 6, 0.15, 0.342\ 9)$$
$$P_{53} = (0.125, 0.230\ 8, 0.3)$$
$$P_{54} = (0.058\ 8, 0.083\ 3, 0.260\ 9)$$
$$P_{55} = (0.105\ 3, 0.12, 0.187\ 5)$$

按公式(6)对每一行的模糊数进行加运算得

$$\tilde{W}_{固频} = \begin{bmatrix} (0.958\ 4, 1.625\ 3, 2.953\ 4) \\ (0.660\ 2, 1.428\ 4, 2.510\ 5) \\ (0.234\ 4, 0.381\ 3, 0.636\ 5) \\ (0.495\ 5, 0.872\ 7, 1.701\ 3) \\ (0.436\ 6, 0.692\ 2, 1.302\ 5) \end{bmatrix}$$

再由式(8)去模糊化得

$$\tilde{W}_{固频} = [1.845\ 7, 1.533\ 0, 0.417\ 4, 1.023\ 1, 0.810\ 5]^T$$

由式(11)归一化为

$$\omega_{固频} = [0.327\ 8, 0.272\ 3, 0.074\ 1, 0.181\ 7, 0.144\ 0]^T$$

$\omega_{固频}$ 即为保持架、外圈、压盖、支承轴、轴承座固有频率相似值在固有频率相似度量中的权重值向量。

而利用比较模糊数可能性程度的方法求得的权重向量为 $[0.376\ 7, 0.315\ 7, 0, 0.184\ 8, 0.122\ 8]^T$,显然压盖的权重为零,不符合要求,此时权重确定是失效的,而应用本文方法可以避免这种情况。

零件固有频率仿真与试验的相似度为

$$Q_{固频} = (0.979\ 4, 0.989\ 7, 0.928\ 7, 0.946\ 4, 0.986\ 1) \omega_{固频} = 0.973\ 4$$

3.3 动态响应频率仿真与试验的相似度

对于不同转速下的动态响应频率的权重采用均权,则

$$\omega_{动态} = \left[\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3} \right]^T$$

动态响应频率的仿真与试验相似度为

$$Q_{温度} = (0.986\ 9, 0.936\ 1, 0.960\ 1) \omega_{动态} = 0.961\ 0$$

3.4 滚动轴承组件仿真系统的可信度

零件固有频率、组件温度场和组件动态响应频率的成对模糊比较矩阵为

$$\tilde{P}_{系统} = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & \left(\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2} \right) & \left(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3} \right) \\ (2, 3, 4) & (1, 1, 1) & \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1 \right) \\ (3, 4, 4) & (1, 2, 3) & (1, 1, 1) \end{bmatrix}$$

可验证一致性比率为 $CR=0.015\ 8<0.1$,其一致性可接受。

计算的零件固有频率、组件温度场和组件动态响应频率的权重向量为

$$\omega = [0.140\ 2, 0.300\ 3, 0.559\ 5]^T$$

则仿真系统与试验系统的相似度为

$$Q_{总} = (Q_{温度}, Q_{固频}, Q_{动态}) \omega = (0.961\ 0, 0.973\ 4, 0.970\ 0) \cdot$$

$$[0.300\ 3, 0.140\ 2, 0.559\ 5]^T = 0.965$$

则该动量轮轴承组件仿真可信度为96.5%。这表明这一滚动轴承组件仿真系统具有较高的可信度,可以用于卫星动量轮轴承组件的动态性能评估。利用以物理试验数据为基准的相似元相似系数计算函数使其标度更客观,基于利用基于三角模糊数的层次分析法确定权重更符合认知习惯,而改进的模糊层次分析求解方法克服了利用比较模糊数可能性程度法确定权值可能失效的问题,因此评估方法更具实用性,评估结果更具客观性。

4 结束语

以卫星动量轮轴承组件应用分析为工程背景,对其仿真可信度评估方法进行了研究。利用卫星动量轮轴承组件仿真与物理试验输出间的相似度对仿真可信度进行评估。构建了轴承组件仿真与物理试验输出间的相似元,建立了相应的相似元相似度量函数。对于基于三角模糊数的AHP法来确定各相似元权重的计算方法进行改进,克服了用比较模糊数可能性确定权值有可能失效的不足。应用本文的方法评估计算得到了某卫星动量轮轴承组件的仿真可信度,验证了本文的卫星动量轮轴承组件仿真可信度评估方法的实用性,为动量轮轴承组件分析设计提供了又一个有力的支持。

参考文献:

[1] Sargent R G. Verification, validation, and accreditation of simulation models [C]//Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. Orlando, USA: [s. n.] 2000, 1: 50-59.

[2] Balci O. Verification, validation, and certification of modeling and simulation applications [C]//Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. New Orleans, USA: [s. n.] 2003, 1: 150-158.

[3] 曹束, 李平, 周根贵. 基于三角模糊数和层次分析法的模型在导弹系统性能评价中的应用[J]. 兵工学报, 2005, 26(4): 566-569. (in Chinese)

CAO Jian, LI Ping, ZHOU Gengui. TFN-AHP model for performance evaluation of missile systems [J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(4): 566-569. (in Chinese)

[4] 杨惠珍, 康凤举, 李俊. 层次分析法在水下航行器系统仿真可信性评估中的应用研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(10): 1299-1301.

YANG Huizhen, KANG Fengju, LI Jun. The application of ahp in integrative process of assessing the credibility of

- underwater vehicle system simulation[J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2002, 14(10): 1299-1301. (in Chinese)
- [5] 柳世考, 刘兴堂, 张文. 利用相似度对仿真系统可信度进行定量评估[J]. *系统仿真学报*, 2002, 14(2): 143-145.
LIU Shikao, LIU Xingtang, ZHANG Wen. Fixed quantity evaluation to reliability of simulation system with similar degree[J]. *Acta Simulata Systematica Sinica*, 2002, 14(2): 143-145. (in Chinese)
- [6] 周美立. 相似性科学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
ZHOU Meili. *Similarity science* [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [7] 杨江, 李治. 仿真模型确认中的数据有效性分析[J]. *西南交通大学学报*, 2003, 38(3): 258-262.
YANG Jiang, LI Zhi. Analysis of data validity in simulation model validation[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2003, 38(3): 258-262. (in Chinese)
- [8] 许若宁, 刘克. 关于 Fuzzy 判断矩阵一致性的讨论[J]. *系统科学与数学*, 2000, 20(1): 58-64.
XU Ruoning, LIU Ke. A note on consistency of fuzzy judgment matrix [J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2000, 20(1): 58-64. (in Chinese)
- [9] Buckley J J, Feuring T, Hayashi Y. Fuzzy hierarchical analysis revisited[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 129: 48-64.
- [10] 隋明刚, 魏巍. Fuzzy AHP 中权重确定方法的探讨与改进[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2000, 23(3): 218-220.
SUI Minggang, WEI Yi. Discussion and improvement on calculating quotiety using fuzzy AHP [J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2000, 23(3): 218-220. (in Chinese)
- [11] Opricovic S, Tzeng G H. Defuzzification within a multicriteria decision model[J]. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge Based Systems*, 2003, 11(5): 635-652.