

# 宇航元器件应用环境识别方法研究\*

## Research on Application Environment Identification Method of Space Component

西北工业大学管理学院 徐国东 郭鹏  
中国空间技术研究院 张延伟

**[摘要]** 针对一种元器件可以被应用于多种航天产品的情况,本文提出可以通过有效整合现有评价方法的手段来提升其应用环境识别的准确性。基于此,本文选取了模糊综合评价方法和聚类分析方法作为主要的识别方法,并给出了结论的确定原则,最后提出可以借助计算机软件来具体实现这一过程。

**关键词:** 宇航元器件 应用环境 模糊综合评价 聚类分析 系统设计

**[ABSTRACT]** According to a component which can be applied in a variety of space products, advices are put forward to improve the application's accuracy of these components with integration of existing evaluation method. Based on this, the fuzzy comprehensive evaluation method and clustering analysis method are selected as the main method of identification, and the principle which can determine the conclusion in given, and finally the idea that we use computer software to realize this recognition process is put forward.

**Keywords:** Space component Application environment Fuzzy comprehensive evaluation Clustering analysis System design

当前,随着我国航天科技工业的发展,对宇航元器件提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。但,宇航元器件应用环境的特殊性决定了其在短期内难以实现技术突破的现状<sup>[2]</sup>,并已成为制约航天科技工业发展的“瓶颈”。在这种情况下,建立统一完整、先进的宇航元器件应用环境识别体系,以支撑航天产品质量的提升<sup>[3]</sup>,也是促进航天产业发展的重要手段。而目前,我国尚缺乏这一体系,对宇航元器件应用环境的确定还主要依靠零散的实验数据和专家的经验判断,缺乏严格的科学依据,所得出的结论往往也存在一定的片面性。因此,为了提升宇航元器件应用环境的整体可靠性,有必要建立一套完备的识别体系。基于此,本文在对当前方法进行总结的基础上,

以模糊综合评价方法和聚类分析方法为基础,提出了一套针对宇航元件器应用环境识别的方法体系,并提出可以通过开发软件系统的方法来简化识别过程的复杂性,最后以 BXRA 元件为例进行了实证研究,结果证明了方法的有效性。

### 1 原理与方法介绍

在识别过程中,首先,根据模糊综合评价方法和聚类分析方法分别给出宇航元器件的应用环境,然后,再根据相关原则确定出最终的结论。

#### 1.1 模糊综合评价方法

模糊综合评价方法的原理和步骤如下:

(1) 指标体系、因素集、评语集的确定以及数据的收集。指标体系是综合评价的基础,其建立的合理与否将会直接影响到评价结果的准确性。因素集是将指标体系的各层次指标用集合的形式表达出来。而评语集的确定,主要是为了得到相关的隶属关系矩阵。数据的收集可以采用调查问卷、实验等方法。

(2) 进行模糊单因素评价,建立模糊关系矩阵  $\tilde{R}$ 。通过隶属函数可计算各指标对不同评语等级隶属度。

(3) 确定各指标层的权重。权重  $W$  的确定主要应用 AHP,该过程需要建立判断矩阵、进行一致性检验以及归一化处理等。

(4) 模糊综合评价。用合适模糊算子将  $W$  与被评价对象的  $\tilde{R}$  合成:  $W \cdot \tilde{R}$  得到各被评价对象的模糊综合评价结果向量  $V_1 = (v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1i}), (v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2i})$  为被评价对象在各指标层上对各个评价等级的隶属度。

(5) 多级模糊综合评价。步骤(4)可看作一级模糊评价,将几个模糊向量合成一个新隶属关系矩阵  $\tilde{R}$ ,将其与上一层指标权重向量  $W$  再进行一次模糊合成,即二级模糊综合评价。有几层指标,就按上述方法进行几次模糊综合评价,最后得到的模糊向量即总模糊评价结果。

(6) 评价结果的单值化处理。单值化处理是将各评语等级赋值,通过模糊评价向量与标准值向量的合成,可将模糊评价结果由一个具体数值表示出来,更加

\* 国家重大专项研究课题资助项目(2009ZX01025-001-601A)资助。

直观<sup>[4]</sup>。

(7)评价结论。根据判据,结合以上的评价结果,可得出该方法下的评价结论。

### 1.2 聚类分析方法

聚类分析方法属于高级统计的范畴,它主要是根据一批数据或者变量的诸多指标特征,通过选择合适的聚类变量,将每一个样本定义为多维空间的一个点,并引用多维空间中点的距离概念定义变量或数据间的相似度。即,点之间的聚类越小,表明两个样本之间的关系越紧密,相似特征越多,就越有可能分在同一类<sup>[5]</sup>。应用该方法可以有效的将一组相关数据或变量划分为若干类,该方法的计算过程一般包括数据标准化处理、对象之间距离的计算、类与类之间距离的定义、依据终止原则进行聚类。

基于以上的原理,可以采取两种方法实现对相关对象的分类:(1)直接应用以上方法,计算对象或类之间的距离,并参照终止准则来确定对象的不同分类;(2)应用SPSS中的Classify模块,对相关数据进行分析,通过输出的谱系图来区分对象的不同分类<sup>[6]</sup>。在具体应用中一般采用第二种方法,即应用计算机来完成相关的聚类工作。

通过谱系图的对比,可以确定出评价对象的类别,即具体应用环境。

### 1.3 最终结论的确定

结合以上对同一对象的不同评价结论,根据“就低不就高”的原则,可确定出对象的最终应用结论。具体确定中,如果两种方法所得出的结果一致,则直接以该结果作为最终结论,如果两种方法所得出的结果不一致,则出于谨慎性原则,选择结果相对较低的结果作为

最终结论。

## 2 试验数据分析

现以BXRA元件为例来进行具体说明该方法的应用。BXRA是航天器中使用较多的一个必备元件,可以被应用于人造地球卫星、空间探测器以及飞船环境中。而且该元件现已积累了丰富的数据资料,为了有效鉴定该类元件的应用环境,现应用以上方法对其具体应用环境进行识别。

### 2.1 模糊综合评价过程

(1)指标体系、因素集、评语集的确定以及数据的收集。

BXRA是一种典型的元件,通过专家组的几次论证,现选取几个重要的指标构建相应的指标体系(表1),并设因素集 $X=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , $n$ 代表准则层指标数,在该评价过程中 $n=3$ 。 $X_j=\{X_{j1}, X_{j2}, \dots, X_{jp}\}$ , $(j=1, 2, \dots, n)$ , $p$ 代表各次准则层包含的指标数,在该评价过程中 $p$ 分别为4、4、3。设评语集 $U=\{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5\}=\{\text{劣, 差, 中, 良, 优}\}=\{1, 2, 3, 4, 5\}$ 。

本文主要通过问卷调查的形式,对BXRA<sub>11</sub>进行了调研。具体操作中,以BXRA<sub>11</sub>的实验数据为基础,由15位专家填写了调查问卷,其中有效问卷10份,统计结果如表1所示。

(2)进行单因素评价,建立模糊关系矩阵。

模糊单因素评价就是从单个指标出发,确定其位于评语集中的隶属度。在此,本文选用模糊统计方法进行确定,即以表1为基础,运用加权平均法对所有专家的意见进行综合,其公式为 $r_{ij}=m_{ij}/n$ ,式中: $r_{ij}$ 为对第 $i$ 个评价指标做出第 $j$ 级评语的隶属度, $m_{ij}$ 为所有专家对

表1 BXRA<sub>11</sub>指标得分情况统计表

专家	适应性				性能				可靠性		
	结构性能	高温性能	低温性能	机械性能	信号完整性	抗门锁能力	ESD性能	抗辐照能力	环境适应性	力学适应性	系统适应性
ZJ1	3	3	3	3	4	3	4	3	4	3	4
ZJ2	5	4	4	4	4	4	4	5	4	4	3
ZJ3	4	3	4	3	4	3	2	3	3	3	4
ZJ4	3	4	4	4	3	4	3	4	3	3	3
ZJ5	4	3	3	4	4	3	4	4	3	3	3
ZJ6	4	2	3	3	3	3	4	3	2	3	3
ZJ7	4	3	3	4	4	3	3	4	3	4	3
ZJ8	3	3	3	4	3	3	4	3	3	3	3
ZJ9	3	2	3	3	3	3	4	4	3	4	4
ZJ10	4	4	4	3	4	3	4	3	4	4	3

第*i*个评价指标在第*j*个评价等级上给出的置信度之和,*n*为参与评价的专家人数。由此可得单因素模糊评价: $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ij})$ 。所有的 $R_i$ 所组成的矩阵 $\tilde{R}$ 即为隶属矩阵,也叫做模糊关系矩阵。具体结果如下所示:

$$\tilde{R}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0 & 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{R}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.4 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{R}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.6 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}。$$

(3) 确定指标权重。

本文中指标权重的计算主要应用 AHP,通过建立判断矩阵、一致性检验以及归一化处理等最终求得了各个指标的权重,各指标的权重具体如下:

$$W = \{0.333, 0.140, 0.527\},$$

$$W_1 = \{0.327, 0.074, 0.136, 0.463\},$$

$$W_2 = \{0.281, 0.133, 0.064, 0.522\},$$

$$W_3 = \{0.222, 0.127, 0.651\}。$$

(4) 一级模糊综合评价。

由于该元器件的指标体系属于两层递阶结构,因此,需要首先进行一级模糊综合评价,具体求解过程如下:

$$V_1 = W_1 \cdot \tilde{R}_1 = \begin{bmatrix} 0.327 \\ 0.074 \\ 0.136 \\ 0.463 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0 & 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ 0.148 \\ 0.4809 \\ 0.4716 \\ 0.0327 \end{bmatrix}^T,$$

$$V_2 = W_2 \cdot \tilde{R}_2 = [0 \quad 0.0064 \quad 0.4926 \quad 0.4488 \quad 0.0522],$$

$$V_3 = W_3 \cdot \tilde{R}_3 = [0 \quad 0.0222 \quad 0.6651 \quad 0.3127 \quad 0]。$$

根据以上的结果,可以得到矩阵 $\tilde{R}$ ,即准则层的模糊关系矩阵:

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.1480 & 0.4809 & 0.4716 & 0.0327 \\ 0 & 0.0064 & 0.4926 & 0.4488 & 0.0522 \\ 0 & 0.0222 & 0.6651 & 0.3127 & 0 \end{bmatrix}。$$

(5) 二级模糊综合评价。

在以上结果的基础上,结合准则层指标的权重,可

以求得二级模糊综合评价结果,计算过程如下:

$$V = W \cdot \tilde{R} = \begin{bmatrix} 0.333 \\ 0.140 \\ 0.527 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0.1480 & 0.4809 & 0.4716 & 0.0327 \\ 0 & 0.0064 & 0.4926 & 0.4488 & 0.0522 \\ 0 & 0.0222 & 0.6651 & 0.3127 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.06188 \\ 0.57961 \\ 0.38468 \\ 0.01820 \end{bmatrix}^T。$$

(6) 评价结果的单值化处理。

给评语集各因素赋值,可使模糊评价结果清晰化。这里,该过程主要采用了 5 分制,评语集各因素分别取值为: $U_1=1, U_2=2, U_3=3, U_4=4, U_5=5$ 。则,

(7) 评价结论。

结合实际应用效果以及专家经验,得分在(4 5]可被应用于飞船及以下环境,得分在(2 4]可被应用于空间探测器及以下环境,得分在(0 2]可被应用于人造地球卫星环境。由以上的计算结果可以很明显的得出  $BXRA_{11}$  可被应用于空间探测器及人造地球卫星环境。

2.2 聚类分析过程

聚类分析过程主要是借助聚类分析谱系图来区分不同对象的具体应用环境,具体过程如下:

(1) 构建初始数据库。为了构建初始数据库,本实例选取了 10 个数据全、代表性强的  $BXRA$  元件(表 2),为保证评价结果的可比性,指标体系仍然采用表 1 中的指标体系(表 2)。

(2) “判据”的获取。将以上数据输入到 SPSS 中,进行聚类,可以得到如图 1 所示的谱系图。

通过该谱系图,结合专家经验以及元件的实际应用效果,可以得出这 10 个元件的具体应用环境,并可将被作为日后的判据使用(表 3)。

(3) 元器件应用环境的确定。结合表 1 中的调研数据,取每一指标的平均值,可获得以下  $BXRA_{11}$  元件各个指标的综合得分,见表 4。

将表 4  $BXRA_{11}$  的数据输入到 SPSS 中,进行再次聚类,可得到如图 2 所示的谱系图。对比图 2,可以看出  $BXRA_{11}$  元件处于  $BXRA_5$  与  $BXRA_7$  之间,而在表 3 中  $BXRA_5$  和  $BXRA_7$  属于第二大类,由此可得出  $BXRA_{11}$  可被应用于空间探测器及人造地球卫星环境。

2.3 最终应用环境的确定

通过以上两种方法都得出了  $BXRA_{11}$  可以被应用于空间探测器及人造地球卫星环境,两种方法所得出的结

表2 BRXA元件历史数据资料

专家	适应性				性能				可靠性		
	结构性能	高温性能	低温性能	机械性能	信号完整性	抗门锁能力	ESD性能	抗辐照能力	环境适应性	力学适应性	系统适应性
BXRA <sub>1</sub>	3	4	4	3	2	4	3	3	4	3	3
BXRA <sub>2</sub>	4	5	3	4	5	3	4	4	5	4	3
BXRA <sub>3</sub>	5	4	4	5	3	4	3	4	5	5	4
BXRA <sub>4</sub>	3	2	3	3	3	2	2	3	3	3	2
BXRA <sub>5</sub>	3	4	3	3	4	4	3	4	3	4	3
BXRA <sub>6</sub>	4	3	3	3	2	4	3	3	3	3	3
BXRA <sub>7</sub>	3	4	3	3	3	3	4	3	3	2	3
BXRA <sub>8</sub>	3	4	4	3	3	4	3	4	3	3	3
BXRA <sub>9</sub>	3	3	3	2	3	3	3	2	3	3	2
BXRA <sub>10</sub>	3	4	4	3	3	4	3	3	3	4	3

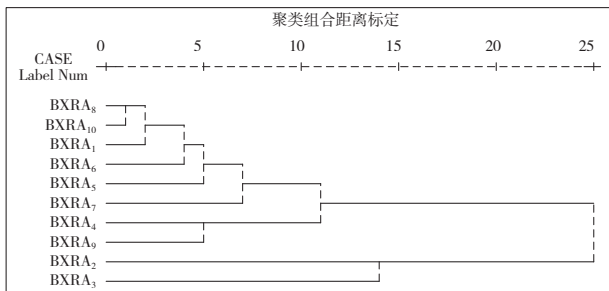


图1 “判据”类聚类分析谱系图

Fig.1 Clustering analysis pedigree chart of criterion

表3 “判据”类BXRA元件应用环境列表

类别	元器件	应用环境
第一大类	BXRA <sub>2</sub> , BXRA <sub>3</sub>	飞船
第二大类	BXRA <sub>8</sub> , BXRA <sub>10</sub> , BXRA <sub>1</sub> , BXRA <sub>6</sub> , BXRA <sub>5</sub> , BXRA <sub>7</sub>	空间探测器
第三大类	BXRA <sub>4</sub> , BXRA <sub>9</sub>	人造地球卫星

表4 BXRA<sub>11</sub>对应的指标数值

评价对象	结构性能	高温性能	低温性能	机械性能	抗辐照性能	信号完整性	ESD性能	抗门锁能力	环境适应性	力学适应性	系统适应性
BXRA <sub>11</sub>	3.7	3.1	3.4	3.5	3.6	3.2	3.6	3.6	3.2	3.4	3.3

论一致,则我们可将此结果直接作为最终的结论。即: BXRA<sub>11</sub> 可被应用于空间探测器及人造地球卫星环境。

### 3 系统设计

宇航元器件应用环境的识别是航天领域的一项常规化工作,为了简化以上步骤和计算过程,可以开发相关的软件系统,将相关的方法内嵌到该软件中,由软件系统来帮助实现这一过程,该软件的设计思路和界面如图3所示。

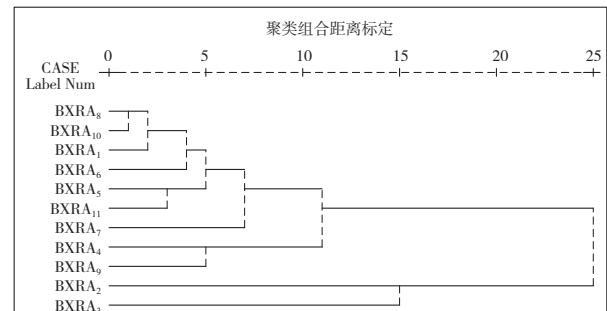


图2 加入待识别元器件后的聚类分析谱系图

Fig.2 Clustering analysis pedigree chart of components which has added the new ones

现结合以上 BXRA<sub>11</sub> 应用环境的识别过程来说明该软件的应用。具体应用中,首先,需要将表2中的数据输入到系统中以创建相应的数据库,此工作可通过点击“新数据输入”和“刷新数据库”来完成。然后,将 BXRA<sub>11</sub> 的调研数据(表1)输入到软件中,此时仍然点击“新数据输入”,并在“待识别元器件名称”处输入 BXRA<sub>11</sub>,点击“运行”,即可得出相关的结论。在识别工作完成后,如果希望将 BXRA<sub>11</sub> 的数据加入数据库,则只需点击“刷新数据库”即可,而如果不将 BXRA<sub>11</sub> 的数据加入数据库,则点击“删除”,将其删除即可。鉴于篇幅的原因,有关该软件的设计原理和思路此处从略。

### 4 结束语

宇航元器件应用环境识别的准确性往往决定着航天产品的整体性能和可靠性,基于此,本文在参照传统做法的基础上,对相关的识别方法进行了整合,并提出可以借助计算机软件系统来完成相关识别过程的建议。

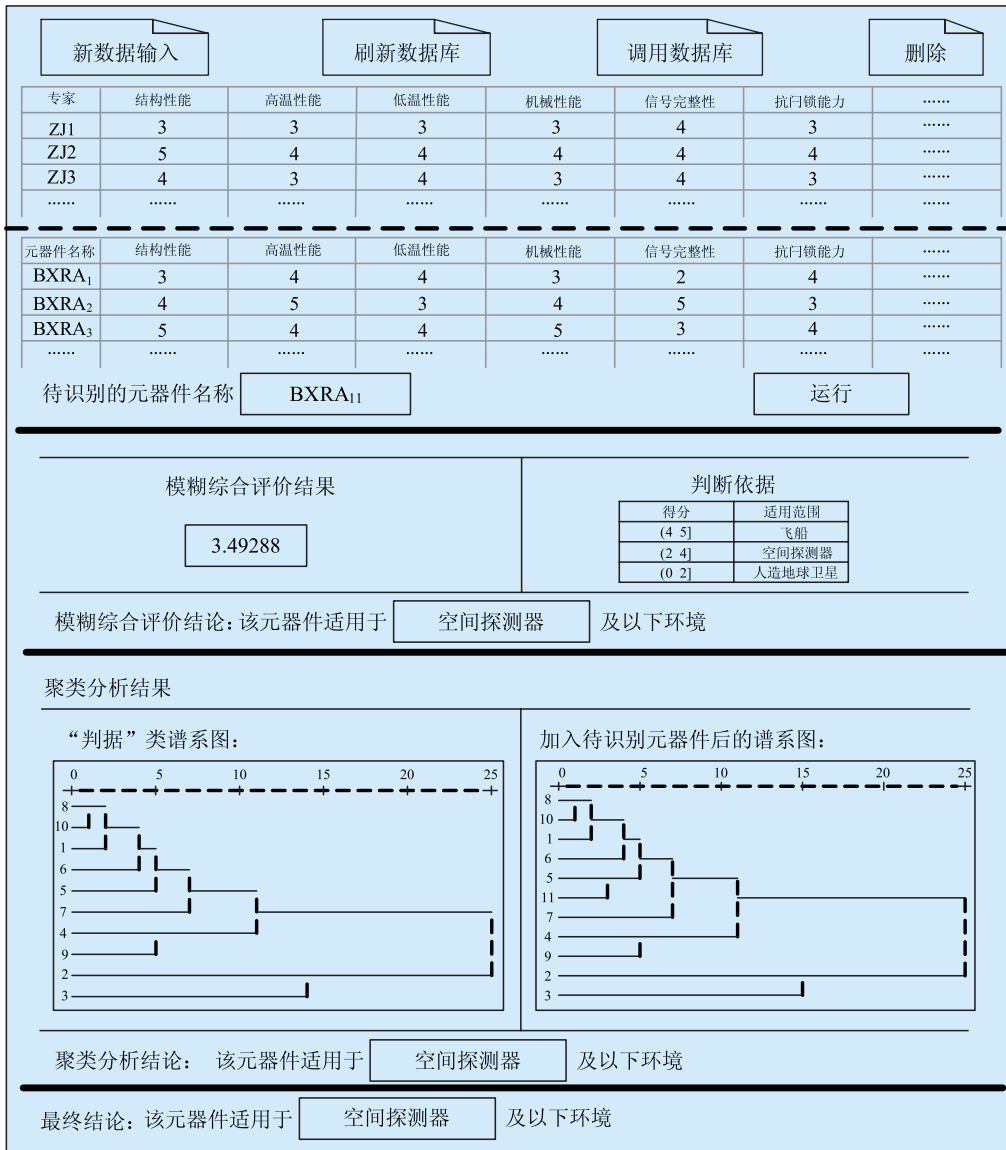


图3 BXRA<sub>11</sub>应用环境识别最终结果图

Fig.3 Final identification result chart of application environment of BXRA<sub>11</sub>

文中所提到的思想和方法可以给航天企业带来如下启示:(1)在元器件识别过程中,出于谨慎性原则,可以采用两种差别较大的识别方法,并对不同结论进行慎重选择,可以在很大程度上保证应用结果的可靠性;(2)通过软件系统的设计与开发可以有效的帮助航天企业对相关数据进行有效存储,这些数据可以作为日后进行相关分析的基础,从而可以有利于航天企业的历史数据追溯和渐进式发展;(3)该系统的开发除了可以帮助航天企业进行元器件应用环境的识别,还可以在在一定程度上促进航天企业信息化的发展。

参考文献

[1] 吴雷,刘沛,刘正高.我国宇航元器件保证信息系统的构建

及运行.航天标准化,2011,31(2):16-23.

[2] 诸一维,蔡娜,王敬贤.从ESCC的0级标准看欧洲宇航元器件的管理思路.质量与可靠性,2009,30(2):53-54.

[3] 卿寿松,夏泓,张月逸.加速构建中国宇航元器件标准体系,大力支撑宇航元器件产品体系建设.航天标准化,2010,33(2):7-10.

[4] 张运凯,王方伟.基于模糊聚类和信息熵的综合评价算法.吉林大学学报(信息科学版),2004,22(6):643-647.

[5] 王鑫,王洪国,张建喜,等.聚类分析方法及工具应用研究.计算机科学,2006,33(2):197-200.

[6] 梁彦冰,崔雪松.SPSS 15.0统计分析与实践应用宝典.北京:中国铁道出版社,2008:326-355.

(责编 日午)

(上接第97页)

减振控制研究.空间结构,2005,(2):1-3.

[25] Wu T. TiNiNb plugs for sealing high pressure fuel passages in fuelinjector applications. International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies.2000.

[26] 金伟,曹明洲,杨锐,等.氧含量对Ni47Ti44Nb9合金组织和相变行为的影响.金属学报,2002,38:510-513.

[27] Liu W, Zhao X Q. Mechanical properties and transformation behavior of TiNiNb shape memory alloys. Chinese Journal of Aeronautics, 2009(22): 540-543.

[28] 郑丽璇. TiNiNb合金的形状记忆性能和物理力学性能的研究.成都:四川大学,2005.

[29] 金伟,曹明洲,杨锐,等.氧含量对Ni47Ti44Nb9合金组织和相变行为的影响.金属学报,2002(38):510-513.

[30] David S, Grummon K L. A New Method for Brazing Nitinol Based on the Quasibinary TiNi-Nb System. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007, 48: 1-7.

[31] 田艳红,王春青,刘威.微连接与纳米连接.北京:机械工业出版社,2010.

[32] 刘正坝.高能束加工技术.北京:航空工业出版社,2003.

(责编 小城)