

基于设计参数综合评价决策的维修性设计方案优选方法*

罗旭,葛哲学,杨拥民

(国防科学技术大学 装备综合保障技术重点实验室,湖南 长沙 410073)

摘要: 针对维修性设计方案的评估优选问题进行分析,给出一种改进的设计参数综合评价优选方法。考虑到维修性设计因素评价的不确定性和模糊性的特点,采用集对分析理论对维修性设计因素的模糊语言值评价进行处理,并将层次赋权方法引入方案贴程度评估决策模型,以提高方案优选的可信性。最后以某航天器电源系统的维修性设计方案优选为例说明了该方法的应用及有效性。

关键词: 维修性;设计方案;评价优选;集对分析;贴程度

中图分类号:TP202 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2012)03-0058-05

Preferred selection method for maintainability design schemes based on integrative evaluation decision-making of design factors

LUO Xu, GE Zhexue, YANG Yongmin

(Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, National University of Defense Technology Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at evaluation and selection of maintainability design schemes, a new preferred selection method based on integrative evaluation of design factors was proposed. Considering the uncertainty and fuzziness of design factors' evaluation, linguistic assessment values of maintainability design factors were quantified on the basis of the set pair analysis theory, and evaluation and decision-making model was established by introducing the weighting method based on AHP into similarity scale of schemes. Finally, preferred selection for design schemes of some manned spacecraft power system was taken as an example to illustrate the application and effectiveness of this method.

Key words: maintainability; design scheme; evaluation and selection; set pair analysis; similarity scale

维修性是由结构设计所赋予的一种质量属性,它是衡量装备维修可行性、有效性和经济性的重要技术指标。由于维修性设计过程中考虑的设计因素较多,而且每种因素具有多种不同的实现途径,导致可能存在若干可行的维修性设计方案。因此,针对已有的多种维修性设计方案,需要综合维修性设计因素进行评估决策,以选择最优的维修性设计方案。

针对维修性设计方案的评价优选问题,Wani和Gandhi分析了维修性各因素之间的相互关系,建立了因素之间的有向网络图及评价矩阵对维修性设计方案进行评估决策^[1];黎放等建立了基于改进灰色分析法的维修性设计评价模型,定量地对维修性设计方案进行评估决策^[2];Corneliu-Alexandru Slavila等应用模糊数学方法,根据维修性定性指标评价得到维修性设计方案的模糊数评价决策值^[3];Chen等应用矢量投影的方法对机械系统设计方案的维修性进行评估决策^[4]。由于

在以上维修性设计方案评价优选方法中,维修性设计因素评价大多是以核对表打分法得到的确定数值形式表现的,忽略了核对评价的不确定性以及人类思维的模糊性,导致决策优选结果的可信度降低,而且由于评估决策模型不能明确维修性设计的薄弱环节,从而影响了维修性设计水平的进一步提高。

因此,本文针对维修性设计因素评价的不确定性和模糊性,研究一种改进的设计参数综合评价决策方法以对维修性设计方案进行优选,同时指出方案设计的相对薄弱环节以激发改进方案的产生。

1 维修性设计因素

影响装备维修性的设计因素较多,根据维修性设计的一般性原则^[5-6],总结归纳出以下7种评价装备维修性的设计因素。

(1) 维修简易性

* 收稿日期:2011-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51005238)和国家部委预研项目(020201)

作者简介:罗旭(1984—),男,湖北当阳人,博士研究生,E-mail:luoxu2002@sina.com

葛哲学(通信作者),男,副教授,博士,E-mail:gzx@nudt.edu.cn

维修简易性是指装备设计在满足功能要求的前提下,尽可能减少零部件数量,并具有良好工艺性技术支持,以简化维修人员的维修工作,降低对人员的技能要求。

(2) 维修可达性

维修可达性是指接近维修部件进行修理、更换或保养的相对难易程度。要求装备维修部位可看的见、够得着,且具有足够的维修操作空间。

(3) 模块化与互换性

模块化与互换性设计要求将功能相对独立的部分从产品中分离出来,形成能够完全互换的、具有物理连接特性的功能模块,且模块之间具有良好的互换性接口,以便于设备的检测与维修。

(4) 拆卸装配性

拆卸装配性是指通过对产品单元之间的装配连接拆卸方式和序列进行设计,以最大限度地减少拆装时间和难度。对需要更换的设备,还需要有即插即用功能的支持。

(5) 维修安全性

维修安全性是指避免维修人员伤亡或产品损坏的一种设计特性。装备维修性设计应采取措施防止维修事故的发生,保证维修活动的安全。

(6) 人素工程

人素工程要求在维修环境中,维修人员的生理因素、心理因素和人体几何尺寸与装备的关系是合理的、科学的,借以提高维修工作效率和质量、减轻人员疲劳等。

(7) 防差错设计

防差错设计是指在装备结构设计时采取措施(防差错结构、识别标志等)消除维修差错的可能性,减少维修人员维修时的差错。

2 基于设计参数综合的维修性评估方法

2.1 建立设计方案语言值评价决策矩阵

假设有 n 种待选择的维修性设计方案,记为方案集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,选取 m 个维修性设计因素指标,记为设计因素集 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ 。则方案集中的方案针对设计因素集中各因素的语言值评价构成了优选问题语言值评价决策矩阵 $S = [s_{ij}]_{n \times m}$, $s_{ij} \in L$, s_{ij} 为方案 i 维修性设计因素指标 j 的评价, $L = \{\text{很差, 差, 较差, 一般, 较好, 好, 很好}\}$ 为七标度语言评价集,其中:很差 < 差 < 较差 < 一般 < 较好 < 好 < 很好。

2.2 基于集对分析量化语言值决策矩阵

针对维修性设计因素的模糊等级语言评价,

引入集对分析方法,通过建立实际评价与完美值之间的集对,对设计因素评价进行量化处理。

① 集对分析^[7-8]

集对分析(Set Pair Analysis, SPA)是由我国学者赵克勤提出的一种处理由模糊、信息不完全等原因所致的不确定性问题的系统分析方法,其重视信息处理中的相对性和模糊性,从问题本身分离出相对确定性信息和相对不确定性信息,用联系数进行统一处理。集对分析联系数是集对某一特性上联系的分离定量刻画,定义为

$$\mu = a + bi_0 + cj_0 \quad (1)$$

其中: $a, b, c \in [0, 1]$ 为实数, a 表示同一程度, b 表示差异不确定程度, c 表示对立程度,三者满足 $a + b + c = 1$; i_0 和 j_0 仅为系数标记。

② 语言值矩阵转化为模糊数矩阵^[9-10]

根据模糊集合理论,将设计因素语言值评价转换成 $[0, 1]$ 区间上的三角模糊数,即:“很差” = $(0, 0, 0.16)$, “差” = $(0, 0.16, 0.33)$, “较差” = $(0.16, 0.33, 0.5)$, “一般” = $(0.33, 0.5, 0.66)$, “较好” = $(0.5, 0.66, 0.83)$, “好” = $(0.66, 0.83, 1)$, “很好” = $(0.83, 1, 1)$ 。则可得语言值评价决策矩阵 $S = [s_{ij}]_{n \times m}$ 对应的模糊数决策矩阵为 $\tilde{S} = [\tilde{s}_{ij}]_{n \times m}$, $\tilde{s}_{ij} = (s_{ij}^1, s_{ij}^2, s_{ij}^3)$ 。

③ 模糊数矩阵转化为联系数矩阵

构建评价 $\tilde{s}_{ij} = (s_{ij}^1, s_{ij}^2, s_{ij}^3)$ 与完美值 $(1, 1, 1) = 1$ 之间的集对 $H = (\tilde{s}_{ij}, 1)$, 将模糊数形式的设计因素指标评价 \tilde{s}_{ij} 转化为联系数形式 μ_{ij} 。

$$\mu_{ij} = a_{ij} + b_{ij}i_0 + c_{ij}j_0 \quad (2)$$

其中: $a_{ij} = s_{ij}^1$, 表示指标值 \tilde{s}_{ij} “能达到完美”的程度; $b_{ij} = s_{ij}^3 - s_{ij}^1$, 表示指标值 \tilde{s}_{ij} “不确定”的程度; $c_{ij} = 1 - s_{ij}^3$, 表示指标值 \tilde{s}_{ij} “不能达到完美”的程度。这样即得联系数形式的方案评价决策矩阵 $\mu = [\mu_{ij}]_{n \times m}$, 以便定量评估决策。

2.3 基于 AHP 法确定维修性设计因素权重

维修性设计因素权重 $W = [w_1, w_2, \dots, w_m]$,

其中 $w_j \geq 0$ 且 $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ 。考虑装备维修的特点,根据各设计因素之间的相对重要性,建立设计因素重要性判断矩阵 $A = [a_{ij}]_{m \times m}$, 其中, a_{ij} 表示因素 q_i 相对因素 q_j 的重要性, $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$, a_{ij} 采用 1 ~ 9 比较标度方法表示。

为保证设计因素权重确定的合理性,需要对矩阵 A 中各元素 a_{ij} 估计的一致性进行检验。计算矩阵的一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1}$, 若矩阵的随机

一致性比率 $CR = \frac{CI}{RI} < 0.1$, 认为判断矩阵 A 的估计具有满意的一致性, 否则需要调整判断矩阵 A , 直到取得满意的一致性为止。矩阵随机一致性比率公式中 RI 为同阶矩阵的平均随机指标, 表 1 列出了 1 ~ 9 阶矩阵的 RI 值。

表 1 RI 值

Tab. 1 The value of average random consistency (RI)

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当判断矩阵 A 的估计具有满意的一致性时, 其最大特征值 λ_{\max} 对应的特征向量 V 经归一化处理得到的向量 W , 即各设计因素的权重向量。

2.4 基于方案贴近度的综合评估决策

根据方案集的评价决策矩阵, 确定正(负)理想决策方案 $x_0^+(x_0^-)$ 作为决策参考。正理想决策方案 x_0^+ 的评估向量为 $\mu^+ = [\mu_1^+, \mu_2^+, \dots, \mu_m^+]$, 其中 $\mu_j^+ = \max_i \mu_{ij} = a_j^+ + b_j^+ i_0 + c_j^+ j_0$ 。负理想决策方案 x_0^- 的评估向量为 $\mu^- = [\mu_1^-, \mu_2^-, \dots, \mu_m^-]$, 其中 $\mu_j^- = \min_i \mu_{ij} = a_j^- + b_j^- i_0 + c_j^- j_0$ 。

贴近度是两个群体相似性程度的描述。对两个联系数 $x = a_x + b_x i_0 + c_x j_0, y = a_y + b_y i_0 + c_y j_0$, 可定义它们之间的贴近度:

$$F(x, y) = \frac{a_x a_y + b_x b_y + c_x c_y}{\sqrt{a_x^2 + b_x^2 + c_x^2} \cdot \sqrt{a_y^2 + b_y^2 + c_y^2}} \quad (3)$$

根据联系数贴近度定义, 计算方案 x_i 与正负理想方案 $x_0^+(x_0^-)$ 在第 j 个设计因素 q_j 下的贴近度 $F(\mu_{ij}, \mu_j^+)$ 和 $F(\mu_{ij}, \mu_j^-)$:

$$\begin{cases} F(\mu_{ij}, \mu_j^+) = \frac{a_{ij} a_j^+ + b_{ij} b_j^+ + c_{ij} c_j^+}{\sqrt{a_{ij}^2 + b_{ij}^2 + c_{ij}^2} \cdot \sqrt{(a_j^+)^2 + (b_j^+)^2 + (c_j^+)^2}} \\ F(\mu_{ij}, \mu_j^-) = \frac{a_{ij} a_j^- + b_{ij} b_j^- + c_{ij} c_j^-}{\sqrt{a_{ij}^2 + b_{ij}^2 + c_{ij}^2} \cdot \sqrt{(a_j^-)^2 + (b_j^-)^2 + (c_j^-)^2}} \end{cases} \quad (4)$$

考虑各设计因素的权重, 即可得到方案 x_i 与正负理想方案 $x_0^+(x_0^-)$ 之间的方案贴近度:

$$\begin{cases} F(x_i, x_0^+) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot F(\mu_{ij}, \mu_j^+) \\ F(x_i, x_0^-) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot F(\mu_{ij}, \mu_j^-) \end{cases} \quad (5)$$

同时, 定义设计因素 q_j 对方案 x_i 综合评价决策的离差影响值:

$$F(\mu_{ij}) = w_j \cdot [F(\mu_{ij}, \mu_j^-) - F(\mu_{ij}, \mu_j^+)] \quad (6)$$

在 $F(x_i, x_0^+)$ 和 $F(x_i, x_0^-)$ 的基础上, 考虑到决策者的决策态度, 引入决策因子 α , 计算方案决策综合值 $F(x_i)$:

$$F(x_i) = \alpha F(x_i, x_0^+) + (\alpha - 1) F(x_i, x_0^-) \quad (7)$$

其中: $\alpha \in (0, 1)$, $\alpha > 0.5$ 时, 决策者在决策中持乐观态度; $\alpha = 0.5$ 时, 决策者在决策中持中立态度; $\alpha < 0.5$ 时, 决策者在决策中持悲观态度。

方案决策综合值 $F(x_i)$ 越大, 说明该方案越靠近正理想方案且远离负理想方案, 其维修性越优, 则 $F(x_i)$ 最大的方案即为维修性最优方案。

设计因素对方案决策的离差影响值 $F(\mu_{ij})$ 越大, 说明该设计因素对方案决策的负面影响越大, 则 $F(\mu_{ij})$ 最大者对应的设计因素 q_j 即为方案 x_i 维修性设计的相对薄弱环节。

3 案例应用分析

以某航天器电源系统为分析对象, 对已有的 4 种维修性设计方案进行评估决策, 选取维修性最优方案。考虑维修简易性、维修可达性、模块化与互换性、拆卸装配性、维修安全性、人素工程和防差错设计 7 个方面的设计因素, 根据专家分析得到 4 个方案在各设计因素下的模糊语言评价, 如表 2 所示, 即构成语言值评价决策矩阵。

表 2 方案集维修性设计因素的语言值评价

Tab. 2 Linguistic assessment values of maintainability design factors

	维修简易性	维修可达性	模块化与互换性	拆卸装配性	维修安全性	人素工程	防差错设计
方案一	较差	一般	好	较好	好	较好	较好
方案二	较好	一般	一般	一般	好	一般	一般
方案三	较好	较好	较好	较好	较好	较好	好
方案四	一般	好	好	好	较好	一般	较差

3.1 获取联系数形式评价决策矩阵

用 2.2 节的量化方法, 将表 2 对应的语言值评价决策矩阵量化为联系数形式的评价决策矩阵 μ , 见式(8)。

$$\mu = \begin{bmatrix} 0.16 + 0.34i + 0.5j & 0.33 + 0.33i + 0.34j & 0.66 + 0.34i & 0.5 + 0.33i + 0.17j & 0.66 + 0.34i & 0.5 + 0.33i + 0.17j & 0.5 + 0.33i + 0.17j \\ 0.5 + 0.33i + 0.17j & 0.33 + 0.33i + 0.34j & 0.33 + 0.33i + 0.34j & 0.33 + 0.33i + 0.34j & 0.66 + 0.34i & 0.33 + 0.33i + 0.34j & 0.33 + 0.33i + 0.34j \\ 0.5 + 0.33i + 0.17j & 0.66 + 0.34i \\ 0.33 + 0.33i + 0.34j & 0.66 + 0.34i & 0.66 + 0.34i & 0.66 + 0.34i & 0.5 + 0.33i + 0.17j & 0.33 + 0.33i + 0.34j & 0.16 + 0.34i + 0.5j \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.2 设计因素赋权

根据7个方面的设计因素对航天器电源系统维修性水平的影响程度进行分析比较,构建设计因素重要性判断矩阵A:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 2 & 2 & 1/3 & 1/2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 & 3 & 1/2 & 1 & 4 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 1 & 1/5 & 1/3 & 2 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 1 & 1/5 & 1/3 & 2 \\ 3 & 2 & 5 & 5 & 1 & 2 & 6 \\ 2 & 1 & 3 & 3 & 1/2 & 1 & 4 \\ 1/3 & 1/4 & 1/2 & 1/2 & 1/6 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$

计算重要性判断矩阵A的随机一致性比率CR,对A中各元素的估计进行一致性检验。由

$$\lambda_{\max} = 7.0554, CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} = \frac{7.0554 - 7}{7 - 1} = 0.009,$$

$$RI = 1.32, \text{得 } CR = \frac{CI}{RI} = 0.007 < 0.1。$$

说明重要性判别矩阵A具有满意的一致性。求解判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max} = 7.0554$ 对应的特征向量:

$$V = [0.251 \ 0.418 \ 0.146 \ 0.146 \ 0.733 \ 0.418 \ 0.093]^T$$

归一化求解,得各设计因素权重向量:

$$W = [0.114 \ 0.190 \ 0.066 \ 0.066 \ 0.332 \ 0.190 \ 0.042]^T$$

3.3 确定理想方案评估向量

根据方案集的联系数形式评价矩阵,分别确定正理想决策方案 x_0^+ 和负理想决策方案 x_0^- 的评估向量 μ^+ 和 μ^- 。

$$\mu^+ = [\mu_1^+, \mu_2^+, \dots, \mu_7^+] = [0.5 + 0.33i + 0.17j \ 0.66 + 0.34i \ 0.66 + 0.34i \ 0.66 + 0.34i \ 0.66 + 0.34i \ 0.5 + 0.33i + 0.17j \ 0.66 + 0.34i]$$

$$\mu^- = [\mu_1^-, \mu_2^-, \dots, \mu_7^-] = [0.16 + 0.34i + 0.5j \ 0.33 + 0.33i + 0.34j \ 0.33 + 0.33i + 0.34j \ 0.33 + 0.33i + 0.34j \ 0.5 + 0.33i + 0.17j \ 0.33 + 0.33i + 0.34j \ 0.16 + 0.34i + 0.5j]$$

3.4 计算方案贴适度决策优选

根据式(4)和(5),计算该航天器电源系统维修性设计方案 x_i 与正(负)理想决策方案 x_0^+ (x_0^-)之间的综合贴适度,如表3所示。

表3 设计方案 x_i 与 x_0^+ (x_0^-)的综合贴适度

Tab.3 Integrative similarity scale between x_i and x_0^+ (x_0^-)

	x_1	x_2	x_3	x_4
$F(x_i, x_0^+)$	0.9187	0.8725	0.9715	0.9400
$F(x_i, x_0^-)$	0.9384	0.9496	0.9055	0.9176

取决策因子 $\alpha = 0.5$,由式(7),计算各个方案的决策综合值 $F(x_i)$,如下:

$$F(x_1) = -0.009848, F(x_2) = -0.038574$$

$$F(x_3) = 0.033013, F(x_4) = 0.011175$$

可见, $F(x_3) > F(x_4) > F(x_1) > F(x_2)$,该航天器电源系统维修性设计方案的优劣排序依次是方案三,方案四,方案一,方案二,故选择方案三为最优维修性设计方案。

通过专家对各个设计方案设计因素的语言值评价,可以发现,相对于方案一、方案二和方案四,方案三每个设计因素评价均较好,特别是对电源系统总体维修性有较大影响的设计因素,即权重较大的维修性设计因素,其评价基本上是4个备选方案中最好的,因此选择方案三作为电源系统最优的维修性设计方案是合理的。同时,选择方案三也符合试验研究的情况,充分说明了本文研究的维修性设计方案优选方法的有效性。

对于方案三,根据式(6)计算设计因素对方案决策的离差影响值 $F(\mu_{3j})$,可得:

$$\max_{1 \leq j \leq m} F(\mu_{3j}) = F(\mu_{35}) = 0.0145$$

可见设计因素 q_5 (维修安全性)是航天器电源系统方案三维修性设计的相对薄弱环节。通过维修安全性设计改进,可使方案三的总体维修性水平进一步有效提高。

4 结论

针对维修性设计方案优选问题,提出一种改进的设计参数综合评价决策方法。该方法采用集对分析理论将维修性设计因素定性评价转化为定量描述,同时考虑设计因素的权重,使得方案贴适度评估决策模型对方案的优劣排序更加科学合理,从而为维修性设计方案优选提供一种有效的方法。

参考文献 (References)

- [1] Wani M F, Gandhi O P. Development of maintainability index for mechanical system[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1999, 65: 259 - 270.
- [2] 黎放, 杨元, 杨建军. 装备维修性设计参数综合评估方法[J]. 工程设计学报. 2008, 15(1): 11 - 16.
LI Fang, YANG Yuan, YANG Jianjun. Integrative evaluation on parameters of maintainability design of mechanical equipment[J]. Journal of Engineering Design, 2008, 15(1): 11 - 16. (in Chinese)
- [3] Slavila C A, Decreuse C, Ferney M. Fuzzy approach for maintainability evaluation in the design process [J]. Concurrent Engineering, 2005, 13: 291 - 299.
- [4] Chen L, Cai J G. Using vector projection method to evaluate maintainability of mechanical system in design review [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2003, 81: 147 - 154.
- [5] 国防科学技术工业委员会. GJB/Z91—1997 维修性设计手册[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
The committee of National Defense Scientific and Technical Industry. GJB/Z91 - 1997 maintainability design manual[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997. (in Chinese)
- [6] 甘茂治, 吴真真. 维修性设计与验证[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
GAN Maozhi, WU Zhenzhen. Maintainability design an evaluation [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [7] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
ZHAO Keqin. Set pair analysis and its preliminary applications [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [8] 杨俊杰, 周建中, 方仍存, 等. 基于集对分析的不确定多属性决策方法[J]. 控制与决策. 2008, 23(12): 1423 - 1426.
YANG Junjie, ZHOU Jianzhong, FANG Rengcun, et al. Uncertain multi-attribute decision making methods based on set pair analysis [J]. Control and Decision, 2008, 23(12): 1423 - 1426. (in Chinese)
- [9] Chiou H K., Tzeng G H. Fuzzy multiple-criteria decision-making approach for industrial green engineering [J]. Environmental Management. 2002, 30(6): 816 - 830.
- [10] 刘英平, 杨素君, 陈晓霞. 不确定信息的机械产品设计方案评价方法[J]. 机械科学与技术. 2008, 27(7): 946 - 949.
LIU Yingping, YANG Sujun, CHEN Xiaoxia. Study of evaluation method for mechanical product design schemes with uncertainty information [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering. 2008, 27(7): 946 - 949. (in Chinese)

(上接第 43 页)

参考文献 (References)

- [1] Mohammad M, Fangming D, Naiffer R, et al. Increased flexural modulus and strength in SWNT/epoxy composites by a new fabrication method [J]. Polymer, 2006, 47 (1) : 293 - 298.
- [2] Varley R J, Hodgkin J H, Hawthorne D G. Toughening of a trifunctional epoxy system: Part VI [J]. Polymer, 2001, 42: 3847 - 3858.
- [3] 李晓丹, 王维, 郭淑齐, 等. 耐高温树脂的固化动力学分析及其力学性能[J]. 纤维复合材料, 2009, 24(4): 24 - 26.
LI Xiaodan, WANG Wei, GUO Shuqi, et al. The analysis of curing kinetics of heat resistant resin and research of its composites performances [J]. Fiber Composites, 2009, 24(4): 24 - 26. (in Chinese)
- [4] 代晓青, 肖加余. 等温 DSC 法研究 RFI 用环氧树脂固化动力学研究 [J]. 复合材料学报, 2008, 25 (4) : 18 - 23. (in Chinese)
DAI Xiaqing, XIAO Jiayu. Curing kinetics of epoxy resin for RFI process using isothermal DSC [J]. Acta Materiate Compositae Sinica, 2008, 25(4): 18 - 23. (in Chinese)
- [5] Barton J M. The application of differential scanning calorimetry (DSC) to the study of epoxy resin curing reactions [J]. Advances in Polymer Science, 1985, 72: 1 - 11.
- [6] 谢旻, 顾轶卓, 李敏, 等. 碳纤维/双马树脂预浸料固化过
程动态力学性能 [J]. 复合材料学报, 2010, 27(4): 52 - 58.
XIE Min, GU Yizhuo, LI Min, et al. Dynamic mechanical analysis of the curing of carbon fiber/bismaleimide resin prepreg [J]. Acta Materiate Compositae Sinica, 2010, 27(4): 52 - 58. (in Chinese)
- [7] Yun N G, Won Y W, Kim S C. Toughening of carbon fiber/epoxy composite by inserting polysulfone film to form morphology spectrum [J]. Polymer, 2004, 45(20): 6953 - 6958.
- [8] Mimura K, Ito H, Fujioka H. Improvement of thermal and mechanical properties by control of morphologies in PES modified epoxy resins [J]. Polymer, 2000, 41 (12) : 4451 - 4459.
- [9] Catalani A, Bonicelli M G. Kinetics of the curing reaction of a diglycidyl ether of bisphenol A with a modified polyamine [J]. Thermochemica Acta, 2005, 438(1): 126 - 129.
- [10] Li P, Yang X P, Yu Y H, et al. Cure kinetics, microheterogeneity, and mechanical properties of the high-temperature cure of vinyl ester resins [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 92(2): 1124 - 1133.
- [11] Kamal M R, Sourour S. Kinetics and thermal characterization of thermoset cure [J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 1973, 13: 59 - 64.