

器材类武警装备环境适应性评估模型研究

巩青歌, 石福丽

(武警工程大学, 西安 710086)

摘要: **目的** 研究器材类武警装备环境适应性评估模型。**方法** 通过分析武警装备环境适应性要求类型及特点, 提出器材类武警装备环境适应性评价因素集, 分析环境因素的影响特征, 基于历史数据和问卷调查确定各环境因素影响的隶属函数。**结果** 建立了考虑时间的器材类武警装备环境适应性模糊综合评估模型。**结论** 通过实例验证了该模型合理, 方法可行。

关键词: 武警装备; 环境适应性; 模糊综合评估; 隶属函数

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2014.05.019

中图分类号: E92 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)05-0097-06

Research on Environmental Worthiness Evaluation Model of Equipments for Armed Police Force

GONG Qing-ge, SHI Fu-li

(Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the environmental worthiness evaluation model of equipments for armed police force. **Methods** Through analysis of the types and characteristics of environmental worthiness requirements of the armed police equipment, the evaluation factor set of environmental worthiness for armed police force was put forward, and the characteristics of the influences of environmental factors were analyzed, based on historical data and the questionnaire survey to determine the environmental factors affecting the membership function. **Results** Then the environmental worthiness fuzzy comprehensive evaluation model of equipments for armed police force was built considering time. **Conclusion** The rationality of the proposed model and the feasibility of the proposed method were demonstrated by examples.

KEY WORDS: equipment for armed police force; environmental worthiness; fuzzy comprehensive evaluation; membership function

收稿日期: 2014-05-08; 修订日期: 2014-06-18

Received: 2014-05-08; Revised: 2014-06-18

基金项目: 武警工程大学基础研究基金资助项目(WJY201205); 武警总部装备部应用项目(XXX系统)

Fund: Supported by the Basic research Foundation Project of Engineering University of CAPF(WJY201205) and the Application Project of CAPF Headquarters Equipment Department(XXX System)

作者简介: 巩青歌(1965—), 女, 陕西周至人, 硕士, 教授, 主要研究方向为数据挖掘、软件工程。

Biography: GONG Qing-ge(1965—), Female, from Zhouzhi, Shaanxi, Master, Professor, Research focus: data mining and software engineering.

近年来,武警装备现代化建设进程加快,配发部队的装备品种不断增加,质量不断提高,高科技含量装备占装备整体的比例也越来越大,可为部队遂行任务提供可靠、有效的保障。同时由于武警部队任务的多样性和复杂性,驻守和执行任务的地域,从内地到边疆,从陆地到海岛,从风雪高原到戈壁沙漠,点多、线长、面广,高度分散,使用环境差别大,所携行装备面临各种极端环境的考验和危害。装备环境适应性等问题日益突出,已成为制约装备效能发挥的关键因素之一。因此,开展武警装备环境适应性研究,对装备在不同环境下适应程度及影响条件的信息进行全面收集、梳理和归类,建立一套系统科学的装备适应性评估体系,能有效促进装备效能发挥和完善优化,对实施装备的精确化保障、精细化管理和精准化科研均具有重要的现实意义。

环境适应性是装备在寿命期内的贮存、运输和使用等状态下,可能会遇到的各种自然和诱发环境因素极端应力的作用下,即不产生、不被损坏和/或能正常工作的能力^[1-2]。GJB 150 规定了军事装备环境适应性试验主要包括高温、低温、湿热、淋雨、太阳辐射、盐雾、沙尘、振动、冲击和低气压等项目^[3]。针对装备环境适应性问题,研究者们分别对航空、舰船、车辆、电子设备及其配件的环境适应性评估模型进行了一些探索性研究。常用的评估方法有直接评价法、相似产品法、相关性评价法、灰色关联分析法、计算机仿真和模糊综合评估方法等^[4-8]。在应用最为广泛的模糊综合评估方法中,至今已有十几种确定隶属函数的方法,代表性的有直觉方法、二元对比排序法和最小模糊度法等^[9]。

针对器材类武警装备使用环境特点,文中以模糊综合评估方法为基础,提出了考虑时间的器材类武警装备环境适应性评估方法。其中,为了提高隶属函数的准确性,提出基于历史数据和问卷调查采用最小模糊度法待定系数法确定环境因素的隶属函数;为了提高评估结果的稳健性,提出在评估装备环境适应性时考虑地区环境因素的时变特点,建立相应的评估模型。

1 武警装备环境适应性要求类型及特点

由于武警与解放军的职责使命不同,配发的装备主要以非致命性类为主,辅助有轻型武器、警用器

材、工程、防化、车辆、船艇等。种类繁多,来源渠道广泛,给装备适应性评估研究带来了一定的复杂性。

装备的环境适应性主要取决于两方面的因素:一是选用的材料、构件、元器件的耐环境能力;二是采用的耐环境设计措施是否有效。其环境适应性要求可以分为对材料及其涂镀层、结构件、连接件的环境适应性要求和功能件(整机、系统、分系统和设备)的环境适应性要求两种类型。

针对武警各类装备性能、结构和配发特点,以及主要面临的环境因素类型(自然环境还是战场环境),笔者对如何开展武警装备适应性评估工作,提出以下的建议和方法。

武警装备以非杀伤性武器为主,主要包括器材类、车辆船艇类、防化类等,根据各类装备的结构特点,可将武警装备环境适应性评估分为以下3类:

1) 对于如头盔、警棍、盾牌等器材类装备,其结构简单、材料单纯、价格便宜、配发数量大、使用频度高,主要受自然环境影响,建议采用基层使用单位在网上随时反馈“定性”类的使用意见,通过xx模型,来评估这类装备的环境适应性。

2) 对于如车辆、船艇类装备,结构复杂,材料、零配件种类多,价格昂贵,使用寿命长,且主要受自然环境因素影响,建议采用多级多因素的模糊综合评判法。

3) 对于防化类装备,其结构复杂,主要由精密器件和特殊材料构成,适应性主要受战场环境影响,其次可考虑自然环境中储存环境影响,建议采用多种方法结合的评估模型评判。

文中重点讨论武警器材类装备的适应性评估问题。

2 环境对器材类装备的影响分析

武器装备所面临的环境可分为两大部分:自然环境和作战环境^[6]。自然环境是指某地域作为战场之前已有的各种环境因素的总和,包括地形、气候、海情、植被、电磁辐射,以及存在于地球表面及其附近的其他环境因素;作战环境指某一地域中以前并不存在,只是作为战场以后由于敌我双方的交互作用才产生的各种环境因素的总和,包括目标特性、电子战环境、火力、核辐射、化学武器、友邻部队情况等。头盔、警棍、盾牌等器材类装备,构件

较少,主要由简单电子线路、机械设备和半机械设备的综合体组成,构成材料容易界定(如主要由塑料、橡胶、PVC等构成)。与解放军相比,武警担负的是国家内部安全保卫任务,器材类装备简单实用,是武警部队执勤、维稳、处突及训练时经常携带的装备。这些装备面临的“作战环境”并不复杂,所以其适应性主要考虑各种自然环境对它们的影响程度。下面重点讨论6种主要环境因素对器材类装备适应性的影响,在此基础上建立器材类装备的适应性评估模型。

1) 温度对武警器材类装备的影响。高温会促使金属氧化,设备过热;引起元器件参数发生漂移或元器件损坏,低熔点焊锡断裂;使绝缘材料的绝缘性能降低、橡胶制品产生发粘和老化;使金属膨胀、材料软化、润滑脂粘度下降,导致机械部分卡、松、接触不良等。低温容易使橡胶、塑料制品变硬、折断或破裂,导致密封不好;使润滑脂粘度增大甚至冻结,导致传递机构摩擦增大、转动困难;引起电子元器件参数发生漂移,导致兵器参数不稳,不能正常工作;各种材料制成的零部件因收缩率不同,导致机件卡死等。

2) 湿度对武警器材类装备的影响。湿度太大容易使绝缘材料绝缘性能下降,导致击穿、短路、漏电、打火等;金属机件锈蚀,导致电蚀加剧;纤维、木制品等发霉、变质;润滑剂变质,失去润滑作用。

3) 太阳辐射对武警器材类装备的影响。太阳辐射会引起老化和物理反应,使一些材料脆化、软化粘合;会导致装备表面特性下降、膨胀、破裂,橡胶变质,绝缘失效,密封失效。

4) 风速对武警器材类装备的影响。大风使装备受力增加,造成结构破坏,机械强度降低,旋转负荷增大,直至烧坏电机。

5) 沙尘对武警器材类装备的影响。沙尘进入装备内部,导致电器产品接触不良、打火、转动和滑动的机件摩擦增加,油路、气路堵塞,精加工面磨伤等。

6) 盐雾对武警器材类装备的影响。盐雾会引起化学反应、锈蚀、电解。使绝缘材料的表面电阻和抗电强度降低,保护膜脱落,表面劣化,电气性能变化。增大磨损,机械卡死,轴承损坏,过滤器堵塞,机械强度下降。产生电化腐蚀,结构强度减弱。

3 器材类装备适应性评估模型

查阅国内外相关文献,研究者在评估装备环境适应性时,主要研究具体环境条件下的装备适应性,而很少考虑某一地区自然环境的时变性对装备适应性的影响。对于器材类武警装备来说,其使用周期基本都是以“年”为单位,而我国大部分地区自然环境年内差异较大,如东北地区温度范围为 $-48 \sim 35^{\circ}\text{C}$,使得装备在一年内不同时段的环境适应性差异较大。因此,为了评价器材类武警装备的环境适应性,不但要考虑地区类型,还应考虑同一地区不同季节的环境特征。

通过上述分析可知:影响装备环境的因素具有随机性、模糊性和不确定性。主要表现在以下3个方面:一是装备执行任务的随机性,如装备从一个地区运输到另一个地区执行任务;二是工作环境描述的模糊性,如工作电压不稳,气候寒冷、温暖或高热等;三是环境参数变化的不确定性,如环境温度和湿度随季节的变更而改变等。针对装备环境因素的这些特点,文中基于历史数据和问卷调查,运用模糊理论建立各因素的模糊隶属度函数,并提出考虑时间的模糊综合评价方法对器材类装备进行环境适应性的综合评估。

3.1 建立环境因素集 U

环境因素集是影响装备环境适应性的各种因素所组成的集合。经过上述分析,影响器材类的环境因素有{温度,湿度,风速,沙尘,盐雾,太阳辐射},可记为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_6\}$ 。

3.2 确定环境因素权重 W

在模糊综合评判中,需要根据每个因素的重要程度,赋予每个因素相应的权重。设第 i 个因素 u_i 的权重记为 w_i ,则因素权重集 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_6\}$ 。确定权重的方法有很多种,常见的有3类,一是主观赋权法,如专家调查法(Delphi法)和层次分析法(AHP);二是客观赋权法,如主成分分析法和变异系数法;三是主客观综合集成赋权法。

通过分析,器材类装备的环境适应性主要取决于它的构成材料。一般情况下,材料性能发挥受单环境因素变化影响的程度在作为装备组件之前都经

过了大量的试验,因此针对特定的材料,相应的装备研发专家对此都应较为清楚,故可采用基于多专家打分的 AHP 方法来确定环境因素权重^[10](限于篇幅,详细方法略)。

3.3 确定模糊评价集 V

在模糊综合评估中,评价集是以评判的各种可能结果为元素所组成的集合。武警部队目前对器材类装备在上述 6 种自然环境下的适应性分析是定性的,是根据专家和基层训练实战反馈的数据综合而定的。为了综合分析各单因素的影响,将产品的环境适应性分为 5 个等级{很好,好,一般,基本适应,不适应},因此评价集可表为: $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ 。

3.4 构建隶属函数矩阵 R

隶属函数矩阵 R 是描述评价因素集和评语集关系的函数,它由表示因素属于某种评语程度的若干组评价向量构成, $R = (r_{ij}) (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n)$ 。 r_{ij} 表示因素 i 隶属于第 j 种评语的程度,且 $\sum_{j=1}^n r_{ij} = 1$ 。常见的隶属函数有高斯型、双侧高斯型、钟型、sigmoid 函数型、sigmoid 差型、sigmoid 积型、Z 型、II 型、S 型、梯形和三角形等。

模糊综合评价中,隶属函数形式的选择与实际应用问题有关。通过分析上文中确定的环境因素集,查阅相关文献,针对以材料为主的器材类装备环境适应性大都可选用梯形或三角形隶属函数^[6]。文中基于历史数据和问卷调查,采用最小模糊度法待定系数法确定环境因素的隶属函数^[7],原理如下:

设论域 U 为实数集,若 $A \in F(U)$ 是正规模糊集,则 $\text{Ker } A = [b, c] \neq \emptyset$,即 $\forall x_0 \in [b, c]$,有 $A(x_0) = 1$ 。若根据经验还可判定 $\text{Supp } A = (a, d)$,则可令:

$$A(x) = \begin{cases} [f_1(x)]^\alpha & x \in (a, b) \\ 1 & x \in [b, c] \\ [f_2(x)]^\beta & x \in (c, d) \\ 0 & x \notin (a, d) \end{cases} \quad \forall x \in U \quad (1)$$

式中: $f_1(x) = (x-a)/(b-a)$; $f_2(x) = (d-x)/(d-c)$ 。

为确定待定系数,需要根据实际背景定出模糊边界点 $x_1^* \in (a, b)$ 和 $x_2^* \in (c, d)$,使得 $A(x_1^*) = A$

$$(x_2^*) = 0.5。于是由式(1)可得: \alpha = -\frac{\ln 2}{\ln[f_1(x_1^*)]}, \beta = -\frac{\ln 2}{\ln[f_2(x_2^*)]}。$$

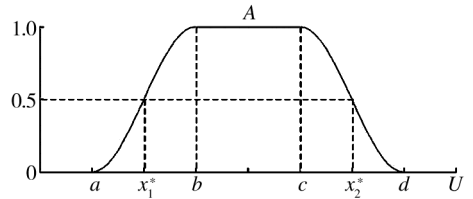


图 1 梯形隶属函数

Fig. 1 Trapezoidal membership function

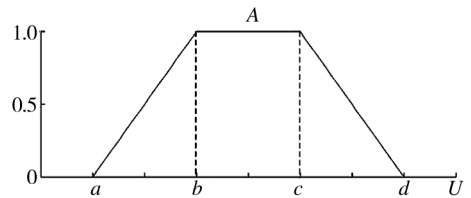


图 2 三角形隶属函数

Fig. 2 Triangular membership function

许多情况下,可取 $\alpha = \beta = 1$,此时隶属函数 $A(x)$ 的图形为梯形。若 $b = c$,即 $\text{Ker } A$ 是单点集,则隶属函数 $A(x)$ 的图形为三角形。

上述方法中,历史数据来源于装备研制单位、厂商和已有的装备适应性数据;调查问卷设计在“网上装备适应性定性评估采集系统”中,该系统的主要目的是长期向基层部队收集装备在实际使用环境下的作战效能、各项性能指标满足程度和部队使用过程中对其适用性的第一手评估数据,建立各种装备的适应性评估数据库。

3.5 确定综合评判集 B

隶属函数矩阵 R 是集合 U 和 V 之间的一个模糊关系。由模糊数学原理, R 确定了一个模糊映射,把 U 上的一个模糊子集 A 映射到 V 上的一个模糊子集 B 。 A 是映射的原像, B 是映射的像。借助于模糊变换 $B = A \cdot R = (A_1, A_2, \dots, A_m) \cdot R = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 。

3.6 计算综合评估结果 G

通过前述步骤可计算出某装备在某一具体环境下的适应性。然而同一地区的环境因素是时变的,假设其变化的频率为 δ 天,则一年可分为 $T=[365/\delta]$ 个时段,记作 $t(t=1,2,\cdots,T)$ 。那么该装备在该地区的年度适应性 g 可通过式(2)计算:

$$g = \frac{\sum_{t=1}^T B_t}{T}$$

(2)

式中: B_t 表示第 t 时段内该装备在该地区的环境适应性。

又因中国地区环境特征明显,笔者结合中国地理区划常识和环境条件特点将中国地域划分为 8 (记为 Z) 个自然区,即华北、华东、华中、华南、西南、西北、东北和青藏地区(记为 $z(z=1,2,\cdots,Z)$)。气候特点主要有:温带季风、温带大陆、亚热带季风 and 高原山地等 4 种。从而,可用加权求和法计算该装备在全国的综合环境适应性 G ,如式(3)所示。

$$G = \sum_{z=1}^Z \lambda_z g_z$$

(3)

式中: λ_z 是地区权重,可用装备配发比例、地区占地面积百分比或其他类似量值来表示。

4 实例分析

本节以 A,B,C 三个型号防暴盾牌为例,用上述方法对它们在中国各地区及整个大陆的环境适应性进行评估。通过调查发现环境因素“太阳辐射”一般情况下很少定量描述,因此将它作为一个定性因

素,不建立其隶属函数。

第一步:基于历史数据估计环境因素隶属函数参数。以式(1)为通用隶属函数,基于历史数据初步估计式(1)所示的环境因素隶属函数参数,见表 1。

第二步:基于调查问卷修正环境因素隶属函数参数。以第一步为基础,设计器材类武警装备环境适应性调查问卷表(限于篇幅,文中只给出了环境适应情况“很好”的填写页面,其余的 4 种适应情况下问卷格式类似),见表 2,其中的“估计值范围”由第一步得到。为了深入研究器材类装备环境适应性,每年向各中队(县级市)收集 1 次调查问卷。使用统计方法修正环境因素隶属函数参数,修正后的值见表 1。

第三步:基于 AHP 法确定环境因素权重。根据 3.2 节,邀请了 7 位专家确定环境因素权重为 $w=\{0.315,0.195,0.143,0.059,0.150,0.138\}$,详细步骤略。

第四步:计算装备的地区适应性。通过收集各地区全年的环境因素值及其变化情况,由式(2)计算待评装备的地区适应性,计算结果见表 3。

第五步:计算装备的全国适应性。本例中以各地区的盾牌配发比例为权重,由式(3)计算装备的全国适应性,计算结果见表 3(限于保密要求,例子中的有些数据做了处理)。

根据实际调研分析,表 3 中的评估结果符合实际情况,说明了文中所提评估模型实现了器材类武警装备环境适应性的量化分析,能为后续装备环境适应性研究提供参考。

表 1 环境因素隶属函数参数估计值与修正值
Table 1 Estimated and corrected values of parameters in the environmental factors membership function

环境因素	a		x_1^*		b		c		x_2^*		d	
	估计值	修正值	估计值	修正值	估计值	修正值	估计值	修正值	估计值	修正值	估计值	修正值
温度/ $^{\circ}\text{C}$	-60	-60	-20	-20	5	5	25	25	35	35	50	50
湿度/%	0	0	20	10	40	30	60	60	80	70	100	100
盐雾沉降量/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	0	0	1	0.5	3	1	5	5	7	5.5	8	8
风速/ $(\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	0	0	1.5	0.5	5.4	1.5	7.9	7.9	13.8	10.8	61.2	61.2
沙尘沉降量/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	0	0	400	100	800	300	1200	800	1600	1000	2000	2000

表 2 器材类武警装备环境适应性调查问卷表

Table 2 The questionnaire of environmental worthiness of equipments for Armed Police Force

装备型号	A 型盾牌	装备使用单位: 辽宁总队沈阳支队					装备使用地区	东北地区
适应情况	环境因素	估计值范围(请选择相应的因素取值范围)					填写你估计的范围	年均影响时间(天) 及月份
很好	温度/℃	-60 ~ -20	-20 ~ 5	5 ~ 25	25 ~ 35	35 ~ 50	有一点	240 天, 每年 3 月份 ~ 10 月份
	相对湿度/%	0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100		
	盐雾沉降量/(mg·m ⁻²)	0 ~ 1	1 ~ 3	3 ~ 5	5 ~ 7	7 ~ 8		
	风速/(m·s ⁻¹)	0 ~ 1.5	1.6 ~ 5.4	5.5 ~ 7.9	8.0 ~ 13.8	13.9 ~ 61.2		
	沙尘沉降量/(g·m ⁻²)	0 ~ 400	400 ~ 800	800 ~ 1200	1200 ~ 1600	1600 ~ 2000		
	太阳辐射强度	很强	强	一般	弱	很弱		

表 3 三类盾牌的地区适应性

Table 3 Region worthiness of three kinds of shields

装备类型		华北	华东	华中	华南	西南	西北	东北	青藏	全国
A 型	配发比例	0.16	0.09	0.23	0.07	0.07	0.18	0.12	0.08	1
	适应性	0.852	0.604	0.917	0.581	0.640	0.871	0.793	0.613	0.788
B 型	配发比例	0.15	0.12	0.13	0.10	0.09	0.14	0.12	0.11	1
	适应性	0.920	0.893	0.947	0.880	0.936	0.915	0.868	0.831	0.864
C 型	配发比例	0.13	0.14	0.14	0.12	0.13	0.15	0.08	0.11	1
	适应性	0.871	0.933	0.945	0.904	0.887	0.928	0.791	0.835	0.894

5 结语

研究器材类武警装备环境适应性是其研制、配发和改进的基本依据。文中所建的器材类武警装备环境适应性模糊综合评估模型,一方面,基于历史数据和问卷调查联合确定环境因素隶属函数参数,提高了参数精度;另一方面,在评估装备环境适应性时考虑地区环境因素的时变特点,提高了评估结果的可用性、稳健性和准确性。

参考文献:

[1] 邓国华. 我国军用电子产品环境适应性低下的原因与对策研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2000, (6): 2—6.
DENG Guo-hua. Causes of and Countermeasures to the Problem of Low Environmental Worthiness of Military Electronic Products[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2000, (6): 2—6.

[2] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].
GJB 4239—2001, General Requirements of Environmental Engineering Equipment[S].

[3] GJB 150—86, 军用设备环境试验方法[S].
GJB 150—86, Military Equipment Environment Test Method[S].

[4] 胥泽奇, 张世艳, 宣卫芳. 装备环境适应性评价[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 54—59.
XU Ze-qi, ZHANG Shi-yan, XUAN Wei-fang. Environmental Worthiness Evaluation of Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 54—59.

[5] 段楠楠, 赵英俊, 周豪. 地空导弹装备环境适应性研究与分析[J]. 装备环境工程, 2009, 6(6): 88—91.
DUAN Nan-nan, ZHAO Ying-jun, ZHOU Hao. Research and Analysis of Environmental Worthiness of Ground-to-Air Missile Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(6): 88—91.

[6] 周林, 陶建锋, 王君. 地空导弹装备环境适应性模糊综合评价模型研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2006, 17(2): 62—66.
ZHOU Lin, TAO Jian-feng, WANG Jun. Research on the Fuzzy-overall Evaluation Model of Environmental Suitability for Ground-to-Air Missile Equipment[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2006, 17(2): 62—66.

- on the Special Problems of High sSpeed Flight Load[J]. Cruise Missile, 2010, 9: 52—57.
- [8] 骆寰宇, 邓忠民, 孙兰, 等. 飞行器声振动力学环境响应预示方法[J]. 战术导弹技术, 2012, 6: 22—27.
- LUO Huan-yu, DENG Zhong-min, SUN Lan, et al. The Methods of the Response Prediction of Aircraft under Acoustic Vibration Environment[J]. Tactical Missile Technology, 2012, 6: 22—27.
- [9] 聂旭涛, 雄飞峤. 运用统计能量分析法预示空空导弹舱内动力学环境[J]. 振动与冲击, 2007, 26(4): 140—144.
- NIE Xu-tao, XIONG Fei-qiao. Predicting Dynamic Environment of Air to Air Missile Module with Statistical Energy Analysis Method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(4): 140—144.
- [10] 李奇志, 陈国平, 邓君. 随机振动环境实测数据无偏评估方法研究[J]. 现代雷达, 2011, 33(2): 70—72.
- LI Qi-zhi, CHEN Guo-ping, DENG Jun. A Study on Unbiased Estimation Data Method of Field Measure in Random Vibration Environment[J]. Modern Radar, 2011, 33(2): 70—72.
- [11] MIL-STD-810F, 国防部试验方法标准 环境工程考虑和试验室试验[S].
- MIL-STD-810F, Standard Method of Test for the Department of Defense, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests[S].
- [12] 范伯钧, 刘炜. 虚拟振动环境试验在导弹研制中的应用[J]. 现代防御技术, 2007, 35(6): 51—54.
- FAN Bo-jun, LIU Wei. Application of Virtual Vibration Environment Test on the Development of Missile [J]. Modern Defence Technology, 2007, 35(6): 51—54.
- [13] 王亮, 商霖, 王乐. 战术导弹结构动力学建模研究[J]. 战术导弹技术, 2013, 1: 24—27.
- WANG Liang, SHANG Lin, WANG Le. Study on the Structure Dynamic Modeling of Tactical Missile [J]. Tactical Missile Technology, 2013, 1: 24—27.
- [14] 陈家炎, 周建川, 陈章位, 等. 多点同步并激振动试验控制系统的设计与实现[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(12): 2676—2679.
- CHEN Jia-yan, ZHOU Jian-chuan, CEHN Zhang-wei, et al. Design and Implementation of Vibration Test Control System of Multi-exciter Synchronization[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(12): 2676—2679.
- [15] 叶建华, 李传日. 多点随机振动试验控制技术[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(1): 124—127.
- YE Jian-hua, LI Chuan-ri. Control Technique of Multi-exciter Random Vibration Test [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(1): 124—127.

(上接第 102 页)

- [7] 王宪成, 何星, 胡俊彪, 等. 发动机环境适应性模糊评价研究[J]. 内燃机工程, 2013, 34(2): 88—91.
- WANG Xian-cheng, HE Xing, HU Jun-biao, et al. Research on Engine Environmental Adaptability Based on Fuzzy Evaluation [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013, 34(2): 88—91.
- [8] 武月琴, 傅耘, 敖亮. 典型环境条件下装备环境适应性的评估方法[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 109—112.
- WU Yue-qin, FU Yun, AO Liang. Equipment Environmental Worthiness Evaluation Method in Representative Environmental Condition [J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 109—112.
- [9] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用(第 4 版)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2013.
- XIE Ji-jian, LIU Cheng-ping. Fuzzy Mathematics Method and Its Application (Fourth Edition) [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2013.
- [10] 李方鹏, 朱信忠, 赵建民, 等. 基于 AHP 多专家评估决策在物流运输方案选择中的应用[J]. 产业聚焦, 2013, 22—24.
- LI Fang-peng, ZHU Xin-zhong, ZHAO Jian-min, et al. Multiple Expert Evaluation Decision Making Based on AHP in the Application of Logistics Transportation Scheme Selection [J]. Computer CD Software and Applications, 2013, 22—24.