

基于云理论的复杂装备维修性指标评价研究

韩朝帅,王 坤,潘恩超,刘瑞起

(防化研究院装备保障研究室,北京 102205)

摘要:针对复杂装备维修性指标评价的不确定性特点及传统方法的不足之处,提出了基于云理论的装备维修性指标评价方法,并以基于虚拟现实的装备维修性验证系统(Equipment Maintainability Test System Based on Virtual Reality,简称EMTS-VR)为对象进行研究分析;在框架结构和试验流程两个方面对EMTS-VR进行优势分析;在EMTS-VR优势分析的基础上,得到其评价指标体系,构建评价指标云模型,进而得到维修性指标综合评价云模型;最后,通过实例分析验证该方法的可行性和科学性。

关键词:维修性评价;云模型;复杂装备;虚拟现实;维修可达性

本文引用格式:韩朝帅,王坤,潘恩超,等.基于云理论的复杂装备维修性指标评价研究[J].兵器装备工程学报,2017(3):72-76.

Citation format:HAN Chao-shuai, WANG Kun, PAN En-chao, et al. Research on Complex Equipment Maintainability Index Evaluation Based on Cloud Theory[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2017(3):72-76.

中图分类号:TJ016

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)03-0072-05

Research on Complex Equipment Maintainability Index Evaluation Based on Cloud Theory

HAN Chao-shuai, WANG Kun, PAN En-chao, LIU Rui-qi

(Equipment Support Laboratory, Chemical Defense Research Institute, Beijing 102205, China)

Abstract: As the evaluation uncertainty of comprehensive equipment maintainability index and the defect of traditional methods, the paper raised the evaluation method of equipment maintainability index according to cloud theory, and researched Equipment Maintainability Test System based on Virtual Reality (EMTS-VR). The paper made advantage analysis to EMTS-VR standing on the angle of frame structure and experimental flow. The paper excogitated evaluation index system based on the previous studies, and built evaluation index cloud theory and got the evaluation cloud theory of maintainability index. Finally, the paper verified feasibility and scientificity of the method.

Key words: maintainability evaluation; cloud model; complex equipment; virtual reality; maintenance reachability

装备维修性水平对其可用性以及任务成功率有着至关重要的作用^[1]。随着新型装备系统结构复杂程度、软硬件高度集成化越来越高,装备系统及相关要素的不确定性也随之提高,对科学有效地进行维修性评价工作,正确判定装备的维修性水平,从方法、技术、资源等各方面都带来了困难和挑战。

关于装备维修性指标评价方法有很多,如模糊综合评判法^[2]、TOPSIS 评判法^[3]、灰色关联度评判法^[4],这些方法对定性指标进行定量描述比较实用,但对定量指标进行定性描述、定性定量指标综合描述时不仅数据要求比较高,在解决指标不确定性、提高评价结果的精确性方面效果也甚微,不能满足新型装备维修性评价的要求。云理论^[5-7]在解决定量

收稿日期:2016-09-25;修回日期:2016-10-29

作者简介:韩朝帅(1993—),男,助理工程师,主要从事装备综合保障研究。

语言值与定性概念之间相互转换时的不确定性问题上具有独特优势,已被广泛应用到学习评价、效能评估、资源预测等各个领域。

本文以目前研究应用较为广泛的基于虚拟现实的装备维修性验证系统^[8-10](Equipment Maintainability Test System Based on Virtual Reality,简称EMTS-VR)为研究对象,对该系统进行优势分析,建立EMTS-VR系统下装备维修性指标评价体系,提出基于云理论的装备维修性指标评价方法,最后通过试验仿真验证该方法的科学性和可行性。

1 EMTS-VR 优势分析

1.1 EMTS-VR 与基于物理样机的维修性试验

EMTS-VR是将虚拟现实技术为主的计算机技术应用到装备维修性仿真试验中,通过操控虚拟人实现虚拟环境下的实时人机交互、沉浸或非沉浸式维修及维修性指标的验证。相对于基于物理样机的维修性试验,EMTS-VR以装备虚拟

样机代替物理样机,对部分或整个维修过程进行仿真,实现装备设计研制阶段并行开展维修性验证工作,克服了装备验证经费昂贵、结构复杂、进度紧张、样本过少等带来的不利影响,为更加客观、全面地验证装备维修性提供技术支撑。具体表现为:虚拟现实技术采用的是虚拟样机,不受贵重件的限制,能注入具有高伤害、毁灭性的故障模式;另外,在装备设计阶段并行开展维修性验证工作,大大降低维修性验证和维修设计更改的费用,减少了物理样机试验带来的资源浪费。图1为EMTS-VR的总体框架结构图。

1.2 EMTS-VR 评价指标体系

维修性指标评价体系主要包括选取体系要素和设计体系结构两大内容。其中每个要素都是体系中一元素,各元素之间的相互作用构成了体系结构。构建EMTS-VR评价指标体系,是指以系统思想为指导,对维修性设计要素进行充分调研和分析,并运用科学的系统工程方法,结合设计要求、虚拟现实仿真特点和体系构建原则,不断改进完善形成维修性设计评价指标体系。

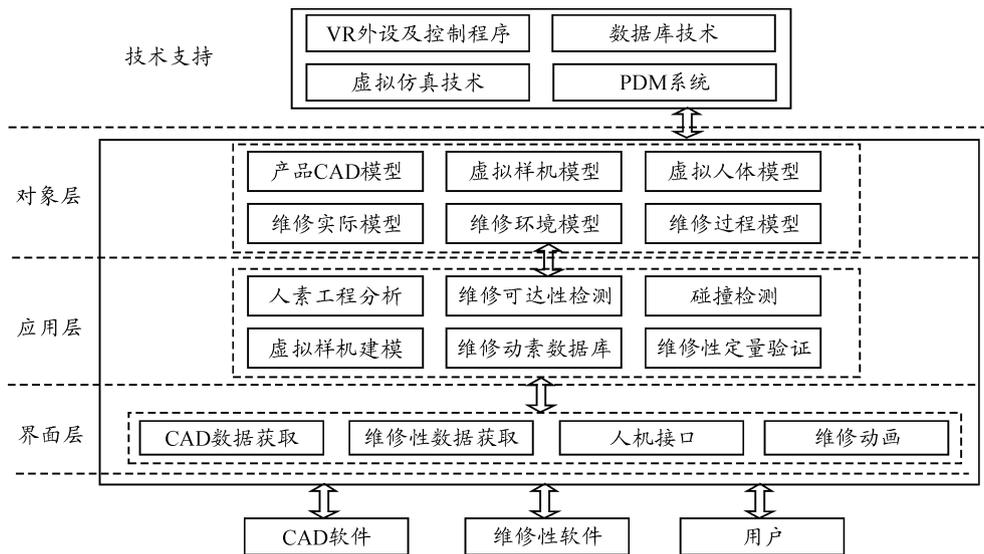


图1 EMTS-VR 总体框架结构

1.2.1 要素选取依据

基于虚拟现实的维修性设计评价要素的选取是指在维修性设计要求的基础上,结合虚拟现实仿真试验的特点进行要素筛选的过程。维修性设计评价要素的选取依据主要包括以下3点:

1) 战斗能力再生需求是选取体系要素的首要考虑因子。例如装备的平均修复时间直接影响装备战斗能力的再生,故应首先考虑选取平均修复时间指标。

2) 装备的结构特点是决定体系要素的重要依据。根据自身特点选择适合装备本身的验证要素,当前装备多以机械部件为主,所以选取时应选择能直接反映装备机械部件的拆卸、分解、检查、更换、修复、安装、校准等维修难易程度和时间长短的要素。

3) 选取要素的同时,必须考虑要素在虚拟环境中验证

的可实现性。一些不能在虚拟环境中表示的要求,不适合选取到EMTS-VR评价指标体系中。

1.2.2 构建体系

结合EMTS-VR特点,按照我国军标关于维修性设计提出的要求和要素选取依据,构建EMTS-VR评价指标体系如图2所示。装备维修性评价指标体系根据维修性要求的不同特点,将指标分为过程属性和产品属性两大类。过程属性中的维修性要求都需要维修人员的参与,结合具体的维修过程才能进行试验与评定。对于系统在虚拟环境下的维修性试验而言,这一类的评价指标包括可达性、维修性时间参数、人因工程和拆卸性。第二类属性为产品属性,这一类属性中的维修性要求都是由产品自身属性决定的,不需要结合虚拟维修过程仿真技术,与“人”的因素关系不大,只需要分析系统详细数字样机几何模型就可以确定。这一类要素包括:简

易性、标准化互换性、防差错能力和维修安全性等。过程属性需要进行试验分析,产品属性往往根据维修人员经验由工程人员通过核对表进行核查评定。

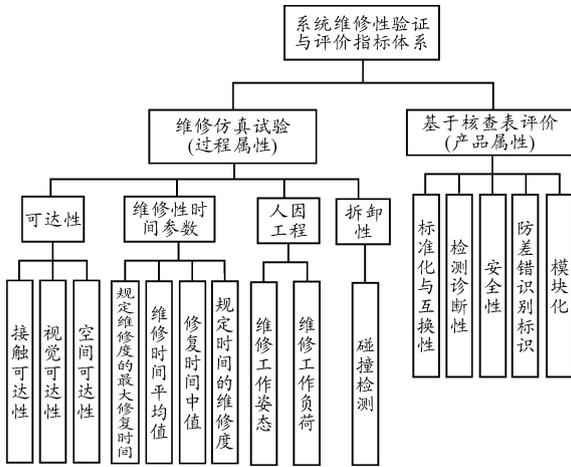


图2 EMTS-VR 评价指标体系

2 维修性验证与评价云模型

2.1 维修性指标评价云模型

2.1.1 确定各指标概念论域

由图3可知,维修性评价指标体系包含定性指标和定量指标,须对各指标进行云变换,以得到各指标的概念论域:

$$W = \{\text{优}; \text{良}; \text{一般}; \text{中}; \text{差}\} = \{A_{i1}(E_{xi1}, E_{ni1}, H_{ei1}); A_{i2}(E_{xi2}, E_{ni2}, H_{ei2}); A_{i3}(E_{xi3}, E_{ni3}, H_{ei3}); A_{i4}(E_{xi4}, E_{ni4}, H_{ei4}); A_{i5}(E_{xi5}, E_{ni5}, H_{ei5})\} \quad (1)$$

其中, $E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - E_x|$, $H_e = \sqrt{S^2 - E_n^2}$, x 为指标样本值。

对于定性指标,概念论域样本可以采取头脑风暴法、德尔菲法等获取;对于定量指标,一般通过收集1000组与待评价装备相似的装备历史数据作为概念论域样本。

2.1.2 指标云化

通过维修仿真试验和核查表评定,收集10组目标系统待评价指标样本,通过逆向云化得到各指标正态云 $U_i(E_{xi}, E_{ni}, H_{ei})$ 。

2.1.3 计算指标隶属度

以各指标正态云的期望值作为一个云滴,输入 X 条件云发生器中,生成各指标对相应概念论域的隶属图和隶属度,进而得到各指标的定性评估结果,图3显示了指标评价流程。

2.2 系统维修性评价云模型

2.2.1 加权云重心综合评判

以云重心法对系统各指标云模型进行加权综合,生成一个 n 维的系统维修性评价云模型。当指标值发生变化,系统维修性评价云亦随之改变,云重心 T 可由 n 维向量表示:

$$T = (T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_n) \\ T_i = a_i \cdot b_i, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

其中, a_i 为指标云重心的位置向量, b_i 为指标权重值。

$$b_i = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{-2 \ln\left(\frac{2(i-1)}{n}\right)}}{n}, & 1 < i \leq \left[\frac{n}{2}\right] \\ \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{-2 \ln\left(2 - \frac{2(i-1)}{n}\right)}}{n}, & \left[\frac{n}{2}\right] < i \leq n \end{cases} \quad (3)$$

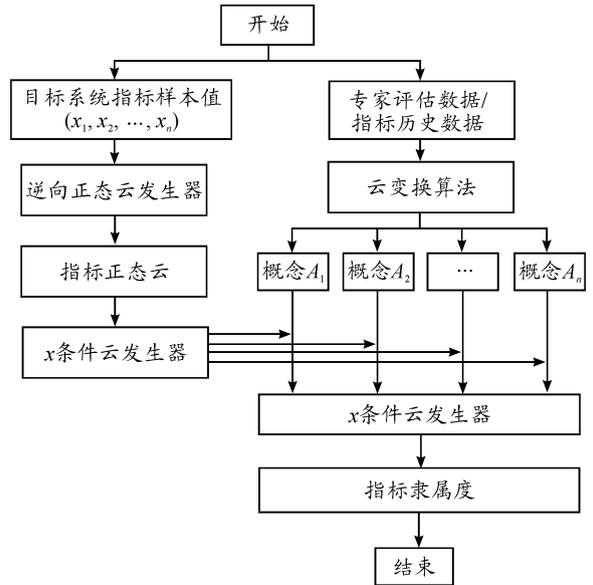


图3 指标评价流程

2.2.2 计算偏离度

根据各指标云模型 $A_i(E_{xi1}, E_{xi2}, E_{ni}, H_{ei})$ 和各指标权重向量 $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 得到系统维修性评价综合云,其云重心 $T' = (T'_1, T'_2, \dots, T'_n)$, 则偏离度为

$$\theta = \sum_{i=1}^n |T_i - T'_i| b_i^* / T'_i \quad (4)$$

其中, $0 \leq \theta \leq 1$, b_i^* 为 b_i 归一化后的权重值。

2.2.3 计算指标体系隶属度

按照2.1.3步骤,将系统维修性评价综合云的期望值代入 X 条件云发生器,生成相对于评价综合云的隶属度,得到被评价系统的维修性定性评估结果。

2.3 评估报告

根据系统和指标的定性评估结果,撰写评估报告,完成该装备系统的维修性评价工作。报告中既要体现该装备的维修性高低,还须对该装备的各指标进行定性描述,为下一步进行装备维修性增长设计提供详细的修正建议。

3 实例分析

对M型装备某部件进行维修性评价,以维修性评价3层指标“可达性”为例进行分析。其他指标可参照此法进行。

1) 根据2.2.1步骤,通过式(1),得到装备武器系统“可达性”指标的概念论域,如表1所示,图4为该指标定性概念论域图。

表1 “可达性”指标概念论域

级别	说明	概念论域
优	维修部位视线非常好,检查、修理或更换部件时有足够的空间,工具轻松到达维修部位	$A_1(0.9,0.048,0.0014)$
良	维修部位视线良好,检查、修理或更换部件时空间正常,工具轻松到达维修部位	$A_2(0.7,0.043,0.0012)$
一般	维修部位可见,检查、修理或更换部件时空间一般,工具正常到达维修部位	$A_3(0.5,0.044,0.0011)$
中	维修部位勉强看得见,检查、修理或更换部件时空间狭窄,工具勉强到达维修部位	$A_4(0.3,0.050,0.0013)$
差	维修部位基本看不见,检查、修理或更换部件时空间十分狭窄,工具很难到达维修部位	$A_5(0.1,0.041,0.015)$

3) 收集各指标数据,按照 2.1.2 对指标“接触可达性”、“视觉可达性”和“空间可达性”云化处理,得到各指标正常云模型集,如图 6 所示。图 6 中 a 为“维修接触可达性”指标云模型, b 为“维修视觉可达性”指标云模型, c 为“维修空间可达性”指标云模型。

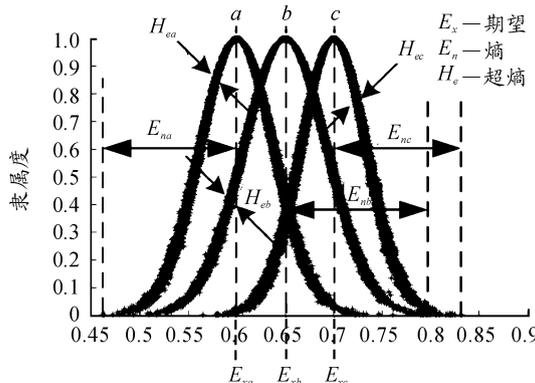


图6 指标云模型图

4) 将各指标期望值代入相应定性概念,得到各指标的隶属度和对应概念,如表 1 所示。

表1 各指标定性概念隶属度及对应概念

4 层指标	μ_{i1}	μ_{i2}	μ_{i3}	μ_{i4}	μ_{i5}	对应概念 A_{ij}
接触可达性	0.35	0.39	0.55	0.52	0.21	A_{13}
视觉可达性	0.24	0.34	0.46	0.59	0.32	A_{24}
空间可达性	0.21	0.32	0.49	0.62	0.42	A_{34}

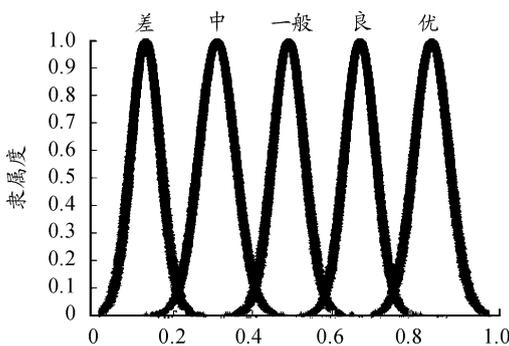


图4 M型装备某部件“可达性”指标的概念论域

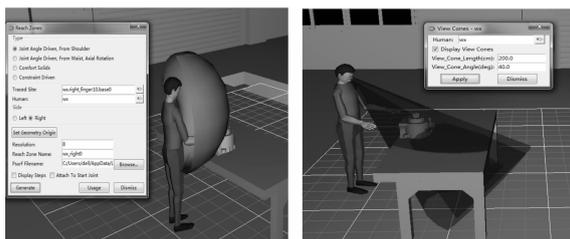
2) 将装备虚拟样机数据导入 EMTS-VR 系统,进行 10 次维修可达性拆装仿真试验,如图 5 所示。

通过式(3),得到该部件 3 层指标“可达性”指标下各 4 层指标权重向量 $b^* = (0.4, 0.3, 0.3)^T$,由式(2)、式(4)及 2.2.3 分别得到该部件的综合云重心向量、偏离度和指标体系隶属度,如表 2 所示。

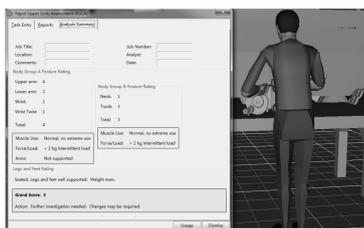
表2 M型装备某部件“维修可达性”评估表

三层指标	综合云重心向量	偏离度	μ_{i1}		
可达性	(0.39, 0.30)	0.261	0.28		
	μ_{i2}	μ_{i3}	μ_{i4}	μ_{i5}	对应概念
	0.45	0.54	0.31	0.26	A_3

由表 1 和表 2 可知,该部队 M 型装备该部件“维修可达性”指标值为 0.591,介于“良”和“一般”之间,更偏向于“一般”;其中“维修接触可达性”指标偏向于“一般”,“维修视觉可达性”指标偏向于“良”,“维修空间可达性”指标偏向于“良”。该结果可作为对上级系统综合评价及装备设计者实施有效改进的依据。



(a) 虚拟维修人员可达域分析 (b) 虚拟维修人员视锥分析



(c) 维修作业空间RULA分析

图5 维修可达性拆装仿真试验

4 结语

针对新型装备复杂性和不确定性特点,提出了采用基于虚拟现实技术和云理论方法进行装备维修性评价,并以实例验证了该方法的可行性和科学性,对装备研制阶段加强维修性设计具有一定的参考指导价值。然而,作为一个复杂性系统理论与实践工程,装备维修性评价分析研究涉及到装备建模、三维仿真、数据挖掘等多个学科领域,亟待研究的前沿性问题很多,不能过分强调其优势,而忽略可能存在的潜在问题。

参考文献:

- [1] GB/T 9414.2—2012. 设计和开发阶段维修性要求与研究[S]. 2012.
- [2] 徐达,李闯. 基于 TOPSIS 的装备维修性定性指标综合评价研究[J]. 航天控制, 2014, 32(5): 92-96.
- [3] 夏良华,王小巍,刘建尧. Agent 技术在维修性设计评估系统中的应用研究[J]. 计算机应用研究, 2002(3): 36-38.
- [4] 徐永成,李岳,陈循. 基于耦合建模与知识流的 RMS 一体化设计[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(7): 1564

- 1570.
- [5] 韩朝帅,曹军海,王玉泉,等. 基于云理论的复杂系统 MTTR 验证方法研究[J]. 航天控制, 2015, 33(4): 32-35.
- [6] 杨峰,王碧萱,赵慧波,等. 基于云模型的战略预警信息系统效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(7): 1334-1338.
- [7] 杨成龙,杨云,王崴,等. 吊车虚拟维修系统的设计及其关键技术[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(7): 94-96.
- [8] 郝建平,蒋科艺. 基于虚拟维修仿真的维修性分析技术研究及系统实现[J]. 数字制造科学, 2004, 2(3): 1-55.
- [9] 吴溪,徐达,王宝琦. 装备维修作业可视性验证方法研究[J]. 机电产品开发与创新, 2012, 25(6): 7-9.
- [10] 韩朝帅,王玉泉,陈守华,等. 基于虚拟现实的维修性定量指标验证方法研究[J]. 航天控制, 2014, 32(6): 23-25.
- [11] 张毅,汪刘应,曹继平,等. 基于模糊综合评判的装备维修效能评估[J]. 兵工自动化, 2015(9): 15-17.
- [12] 柳月青,徐吉辉. 基于改进支持向量机的航空装备维修安全评估[J]. 火力与指挥控制, 2016(9): 66-69.

(责任编辑 周江川)

(上接第 26 页)

参考文献:

- [1] 黄赛帅. 靶场时统设计[D]. 南京:南京理工大学, 2009.
- [2] 李卓,开百胜. 一种用于靶场多台站的时间同步电路设计[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(2): 55-58.
- [3] 冯广飞,谢军伟,杨守国. 一种双/多基地雷达时间校准的新方法[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(10): 56-59.
- [4] 涂文杰,杨雷,谭显春. 时间统一系统同步误差测量方法研究[J]. 中国舰船研究, 2009, 4(6): 62-65.
- [5] IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems[S]. IEEE 1588-2008, 2008.
- [6] MOIDOVANSKY A. Application of IEEE 1588 in Industrial Automation and Motion Control Systems[C]//Rockwell Automation, Presentation in the IEEE 1588 Workshop Tutorial, 2005.
- [7] 桂本炬,刘锦华. IEEE1588 高精度同步算法的研究和实

- 现[J]. 电光与控制, 2006, 13(5): 90-94.
- [8] NA C, OBRADOVIC D, SCHEITERER R L. Synchronization Performance of the Precision Time Protocol[C]//Precision Clock Synchronization Meas, Control Commun, Vienna, Austria, 2007: 25-32.
- [9] SCHRITERER R L, OBRADOVIC D, NA C, STEINDL G. Synchronization Performance of the Precision Time Protocol: Effect of Clock Frequency Drift on the Line Delay Computation[C]//Proc, WFCS, Dresden, Germany, 2008: 243-246.
- [10] 陈重,李浩. 晶振稳定度对 IEEE1588 的影响研究[J]. 通信技术, 2011, 44(2): 67-69.
- [11] SCHRITERER R L, OBRADOVIC D, NA C, et al. Synchronization Performance of The Precision Time Protocol in the Face of Slave Clock Frequency Drift[C]//Proc. IEEE CASE Conf, Washington DC, 2008: 554-559.

(责任编辑 周江川)