

doi: 10.7690/bgzdh.2014.07.009

基于虚拟现实的装备维修性时间指标验证系统研究

王玉泉, 韩朝帅, 单志伟, 王琴琴

(装甲兵工程学院技术保障工程系, 北京 100072)

摘要: 为了对装备进行维修性时间参数试验及判定估计, 提出一种基于虚拟现实的装备维修性时间指标验证方法。从总体方案、关键技术、维修动素数据库开发和时间指标建模 4 个方面进行分析, 利用国军标对维修性时间参数提出的验证方法, 在总成级 \overline{M}_{maxct} 验证模型的基础上, 构建了系统级 \overline{M}_{maxct} 验证模型, 并以某型两栖步战车综合传动系统为例进行了实例分析。实例分析结果证明, 该方法为实现装备研制和维修性验证并行开展提供了新的依据。

关键词: 维修性验证; 虚拟现实; 时间指标; 最大修复时间

中图分类号: TJ811+.2 **文献标志码:** A

Study on Equipment Maintainability Time Parameters Verification System Based on Virtual Reality

Wang Yuquan, Han Chaoshuai, Shan Zhiwei, Wang Qinjin

(Department of Technical Support Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: For carrying out equipment maintainability time parameters test and judgment evaluation, put forward equipment maintainability time parameters verification method based on virtual reality. This article analyzes the method from the overall scheme, key technology, repair therblig database development and time index model. Then, construct the system level \overline{M}_{maxct} verification model on the basis of the assembly \overline{M}_{maxct} model of the validation by using the verification method is proposed to maintenance time parameters of the national military standard. Finally, taking the integrated transmission system in a certain type amphibious vehicle is analyzed as an example. The test analysis result shows the method provides a new basis for paralleling equipment development and maintainability verification.

Keywords: maintainability verification; virtual reality; time parameter; maximum time to repair

0 引言

维修性时间指标的验证^[1]是指在规定的环境和条件下进行维修性时间参数试验, 并对试验数据分析判定估计, 以确定是否满足指标要求。维修性验证工作一直是我军研究维修性的重点和难点, 目前应用最广泛最成熟的一种方法是将统计试验和流程估算相结合的维修性验证方法。随着虚拟现实技术的不断改进成熟, 其沉浸性、交互性和构想性的特点使虚拟现实技术在装备维修性验证中的作用越发突出, 大大减少了维修性试验所消耗的时间和费用, 为实现维修性研制和验证并行提供了技术保障。

目前, 虚拟现实技术在国内维修性验证中的应用大多为维修可达性可视性、干涉和碰撞检测等维修性定性指标的验证^[2]。笔者提出一种基于虚拟现实的装备维修性时间指标验证方法(EMTPV-VR), 使得在装备设计研制阶段并行研究维修性时间指标的验证得以实现, 也为研究维修性时间指标验证提出了新的方法和思路。

1 EMTPV-VR 方案研究

1.1 总体方案

EMTPV-VR 的实质是实现沉浸交互式维修性时间指标验证。首先, 需要建立装备的数字样机和时间指标验证所需维修环境模型, 并进行碰撞检测; 其次, 将装备维修过程进行分解到基本作业单元, 结合维修标准时间库构建维修动素标准数据库; 然后, 根据维修所需连接系统 VR 外设及控制程序; 最后在虚拟现实仿真环境下进行维修性时间指标的仿真、数据采集和验证。图 1 为 EMTPV-VR 系统结构框架图。

1.2 关键技术

1.2.1 维修环境动态建模

根据合同规定的验证环境要求, 使用 3ds MAX 软件构建验证环境静态模型, 一般包括修理厂、地沟、维修设备、操作台及维修工具等模型。将模型导入 VRP 编辑器, 使维修环境由静转动, 构建维修

收稿日期: 2014-01-14; 修回日期: 2014-02-27

作者简介: 王玉泉(1964—), 男, 河北人, 博士, 教授, 从事装备质量管理研究。

环境动态模型。

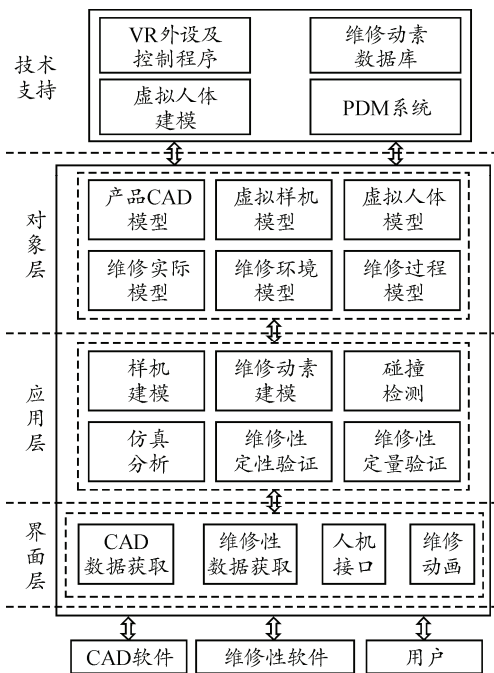


图 1 PMQPV-VR 系统结构框架

1.2.2 实时交互系统设计

该环节是虚拟现实技术的核心技术之一，主要包括环幕投影系统、头盔显示器、数据手套、3D眼镜及驱动程序的设计。通过头盔达到位于现实环境中的 3D 视觉效果，戴上数据手套可以实现控制虚拟环境中虚拟人对工具的提取、装备的拆卸等维修动作；所以，设计 VR 外设和控制程序时必须尽量与现实环境相一致，手套的设计必须能高精度实现各类虚拟动作的操作。

1.2.3 虚拟样机建模

在不影响验证精准度的基础上，构建适用于虚拟仿真试验的装备 CAD 数据，使其导入系统环境中后能够支持整个虚拟维修过程空间、时间和自由度约束。最后，将样机与设计手套连接配置，使其能精确完成维修拆卸、安装的虚拟仿真。

1.2.4 碰撞检测

碰撞检测^[3]是虚拟现实的一个重要环节，在某种程度上代表了系统的现实模拟程度，主要作用是检测系统中各物体的物体边缘是否发生碰撞。常用的碰撞检测技术主要有凸体碰撞检测技术、基于图像空间的碰撞检测技术、面向参数曲面的碰撞检测技术及包围体碰撞检测技术。图 2 为某型装甲车变速箱主轴和输出轴虚拟环境下面向参数曲面的碰撞检测映射图。

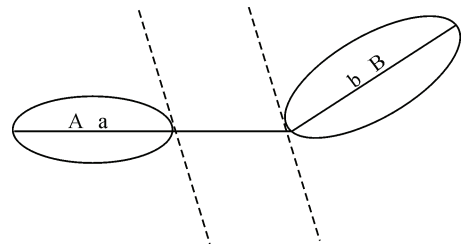


图 2 某型装甲车变速箱主轴与输出轴面向参数曲面的碰撞检测映射

1.3 构建维修动素数据库

在 EMTPV-VR 系统中进行仿真试验后，如何处理仿真数据是研究维修性时间指标验证的一项重要工作。国军标 GJB2072—94《维修性试验和评定》中提供的维修性时间指标验证方法都是针对整车进行的，缺少针对装备各子系统乃至各个设备总成的验证方法，不适用于基于 EMTPV-VR 系统的维修性时间指标验证。维修动素数据库的建立很好地解决了这个问题。

维修动素数据库包括基本维修动作库和维修标准时间库。构建针对每一型号装备所有故障的维修模型明显不切实际，所以构建维修动作库时必须把维修过程分解到基本作业单元。例如吊装车辆变速箱时必须启动吊车，分解到基本作业单元就是“修理人员右手抓握吊车开关(视线投向开关)—右手大拇指按下开始开关(视线转向吊车)—吊车启动”。通过实际统计或数学计算得到与基本作业相对应的维修标准时间，进而构建维修标准时间库。例如构建维修人员运动时间数据库时，必须从维修人员年龄阶段和运动姿态出发，去统计分析每行走一步所花费的时间，由专家评定后得到包含各年龄段维修工、各类运动姿态的维修标准时间库。图 3 为维修过程分解及标准时间模型图。

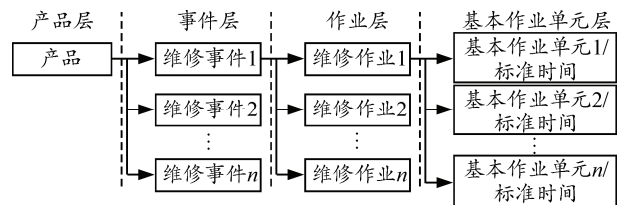


图 3 维修过程分解及标准时间模型

2 虚拟仿真维修性时间指标验证

国军标对 8 种常用的维修性时间参数提出了 11 种验证方法，其中维修时间平均值 ($\overline{M}_{ct}, \overline{M}_{pt}$) 和最大修复时间 (\overline{M}_{maxct}) 最能反映装备实际维修水平^[4]。笔者通过规定百分比的最大维修时间参数来进行维修性时间指标验证研究。

虚拟仿真试验^[5]相对于物理样机试验能节省时间、费用上的消耗，但是其完全虚拟样机试验的特性决定了虚拟试验不能直接得到系统级维修时间样本，图4为基于虚拟现实的系统样本层次框图示例。笔者针对EMTPV-VR系统的特性，在总成级 $\overline{M}_{\max ct}$ 验证模型的基础上，构建了系统级 $\overline{M}_{\max ct}$ 验证模型。

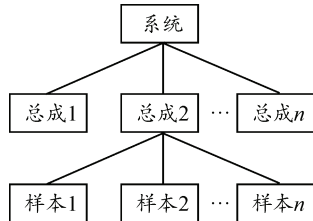


图4 基于虚拟现实的系统样本层次框图示例

2.1 总成级最大修复时间模型

实践表明^[6]：装备维修时间基本服从对数正态分布，少数服从指数分布和正态分布。对数正态分布^[5]不仅能较好地描述大多数的装备总成级维修时间，也同样适用于系统级的维修时间分布，故笔者采用对数正态分布模型来进行 $\overline{M}_{\max ct}$ 的验证研究。

1) $\overline{M}_{\max ct}$ 点估计。

$\overline{M}_{\max ct}$ 的估计值为：

$$\overline{M}_{\max ct} = \exp(\hat{\theta} + Z_p \hat{\sigma}) \quad (1)$$

其中： $\hat{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln X_i$ ； $\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln X_i - \overline{\ln X})^2$ ；

P 为规定的百分比。

2) 置信度为 $1-\alpha$ 的 $\overline{M}_{\max ct}$ 区间估计。

① 单侧置信上限：

$$\overline{M}_{\max ctU} = \exp \left[\overline{\ln X} + \left(Z_p + Z_{1-\alpha} \right) \left(\frac{1}{n} + \frac{Z_p^2}{2(n-1)} \right) \hat{\sigma} \right] \quad (2)$$

则置信区间为 $[0, \overline{M}_{\max ctU}]$ 。

② 双侧置信下、上限：

$$\overline{M}_{\max ctL} = \exp \left[\overline{\ln X} + \left(Z_p + Z_{\alpha/2} \right) \left(\frac{1}{n} + \frac{Z_p^2}{2(n-1)} \right) \hat{\sigma} \right]$$

$$\overline{M}_{\max ctU} = \exp \left[\overline{\ln X} + \left(Z_p + Z_{1-\alpha/2} \right) \left(\frac{1}{n} + \frac{Z_p^2}{2(n-1)} \right) \hat{\sigma} \right] \quad (3)$$

所以置信区间为 $[\overline{M}_{\max ctL}, \overline{M}_{\max ctU}]$ 。

2.2 系统级最大修复时间模型

1) $\overline{M}_{\max ct}$ 点估计。

系统 $\overline{M}_{\max ct}$ 与总成 $\overline{M}_{\max ct}$ 的关系如下：

$$\overline{M}_{\max ctS} = \frac{\sum_{j=1}^m \overline{M}_{\max ctj} \lambda_j}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} \quad (4)$$

其中 λ_i 为总成 j 的故障率。

2) 置信度为 $1-\alpha$ 的 $\overline{M}_{\max ct}$ 区间估计。

① 单侧置信上限：

$$\overline{M}_{\max ctSU} = \exp \left[\sum_{j=1}^m k_j \mu_j + Z_p \sum_{j=1}^m k_j \times \hat{\sigma}_j + Z_{1-\alpha} \sqrt{\sum_{j=1}^m \frac{(2 + Z_p^2) k_j^2 \hat{\sigma}_j^2}{2n}} \right] \quad (5)$$

其中 $k_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j}$ ， $\mu_j = \overline{\ln X_j}$ ，则置信区间为

$[0, \overline{M}_{\max ctSU}]$ 。

② 双侧置信下、上限：

$$\overline{M}_{\max ctSL} = \exp \left[\sum_{j=1}^m k_j \mu_j + Z_p \sum_{j=1}^m k_j \times \hat{\sigma}_j + Z_{\alpha/2} \sqrt{\sum_{j=1}^m \frac{(2 + Z_p^2) k_j^2 \hat{\sigma}_j^2}{2n}} \right]$$

$$\overline{M}_{\max ctSu} = \exp \left[\sum_{j=1}^m k_j \mu_j + Z_p \sum_{j=1}^m k_j \times \hat{\sigma}_j + Z_{1-\alpha/2} \sqrt{\sum_{j=1}^m \frac{(2 + Z_p^2) k_j^2 \hat{\sigma}_j^2}{2n}} \right] \quad (6)$$

所以置信区间为 $[\overline{M}_{\max ctSL}, \overline{M}_{\max ctSu}]$ 。

3 最大修复时间验证实例分析

某型两栖步战车综合传动系统由组合式机械液力传动箱、左右侧变速箱和风扇传动箱组成。建立行动装置虚拟样机，构建虚拟人并连接外置设备，调用维修动素数据库，在EMTIV-VR系统中进行虚拟仿真试验，对规定百分比为90%的系统最大修复时间进行验证。表1为虚拟试验得到的各总成维修时间样本。

表1 虚拟试验得到的各总成维修时间样本

总成	故障率	维修时间/h									
液力传动箱	0.002	2.4	2.5	2.4	2.3	2.6	2.4	2.5	2.3	2.8	2.1
左右侧变速箱	0.001	4.5	4.8	5.2	4.6	5.0	4.5	4.7	5.3	4.9	5.2
风扇传动箱	0.002	1.5	1.6	1.4	1.8	1.5	1.4	1.7	1.6	1.3	1.9