

基于使用数据的航空装备保障效能仿真基准模型构建方法

周岩*, 曾照洋, 周扬, 贾治宇, 袁锴

中航工业综合技术研究所 综合保障研究室, 北京 100028

摘 要: 针对当前保障效能仿真技术引入国内后一直无法在型号应用中取得良好效果的现状, 创新性地提出了基于使用数据的航空装备保障效能仿真基准模型构建方法。首先, 在自主研发保障效能仿真平台ILSLab-Sims的基础上, 提出了一套完备的使用数据采集方案; 其次, 在对航空装备维修保障过程分析的基础上, 运用离散事件建模方法和计算机建模与仿真技术建立了飞机维修保障仿真模型; 然后, 以完好率为校验指标, 提出了一套基于Z检验确定保障效能仿真基准模型的校验方法; 最后以某典型航空装备为例, 对上述基准模型构建方法的有效性进行了验证, 并做了进一步的应用分析。

关键词: 基准仿真模型; 航空装备; 保障效能仿真; 使用数据

中图分类号: V219

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2016) 02-0042-06

保障效能仿真技术的出现,可以有效解决当前国内航空装备综合保障效能指标验证考核无手段、论证无依据、权衡优化无方法的问题^[1,2]。近年来,随着我国大批新型号航空装备的立项与研制,为了对综合保障工作进行有效的监督管理,确保交付的航空装备具有优良的性能并达到规定的战备完好性要求,军方明确要求在装备设计定型前开展保障效能评估工作,以回答研制总要求中提出的综合保障效能指标问题。

国外在航空装备保障效能仿真评估方面的研究起步较早,已经形成了较丰富的保障效能仿真评估模型。美军开发的相关模型最多、最全、最成熟,包括后勤复合模型LCOM、装备保障性仿真工具SCOPE、战备完好性评估模型METRIC等。这些仿真系统和模型在提高战备完好性、优化保障资源配置、减少装备寿命周期费用、制定维修规划等方面发挥了极其重要的作用^[3-5]。其中,美国空军后勤司令部和兰德公司联合开发的仿真工具LCOM得到了最为普遍的认可,美国空军利用LCOM建立了各型航空装备基于使用数据的保障效能仿真基准模型(是指能充分代表某一类航空装备(如无人机、直升机、战斗机、运输机等)设计和使

用的排故过程模型,通常选用现役较成熟的航空装备),并将其作为美国空军的标准数据系统,用于开展改进改型航空装备的后勤保障研究以及装备采办过程中的仿真验证^[6-8]。在国内,中航工业综合技术研究所深入研究LCOM模型的基础上,成功开发了基于LCOM模型原理的保障效能仿真评估系统ILSLab-Sims,并进一步扩展了活动网络图建模功能,为保障过程描述提供了更直观的图形化建模方法。但国内基础数据的缺失,导致保障效能仿真技术一直无法在型号应用中取得良好的效果^[9,10]。

综上可知,航空装备保障效能仿真基准模型是开展具体工作的基础,各型航空装备保障仿真基准模型的建设和不断积累是保障效能仿真评估业务不可替代的核心能力。基于上述背景,本文通过开展使用数据采集方案、保障效能仿真模型构建及校验方法的研究,提出一套基于使用数据的航空装备保障效能仿真基准模型构建方法,为改进改型航空装备在定型阶段保障性要求的考核鉴定、研制阶段保障系统的科学规划、使用阶段保障资源的配置优化等提供支撑。

收稿日期: 2015-09-30; 退修日期: 2015-10-09; 录用日期: 2015-12-14

*通讯作者. Tel.: 15011580850 E-mail: zhouyan_buaa@163.com

引用格式: ZHOU Yan, ZENG Zhaoyang, ZHOU Yang, et al. The construction method of aviation equipment support effectiveness simulation benchmark model based on use data [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(02): 42-47. 周岩, 曾照洋, 周扬, 等. 基于使用数据的航空装备保障效能仿真基准模型构建方法[J]. 航空科学技术, 2016, 27(02): 42-47.

1 使用数据采集

航空装备保障效能仿真基准模型构建需要大量的数据输入作为支撑,一方面包括装备的设计数据,如构型数据、RMTS(可靠性/维修性/测试性/保障性)设计特性数据;另一方面,还包括装备的外场使用数据,如飞行任务数据、故障统计数据、使用保障数据、预防性维修数据、各外场可更换单元(LRU)维修保障流程数据、保障资源配置数据、完好率统计数据等。其中,外场使用数据是保障效能仿真基准模型构建的核心基础,直接决定了仿真系统运行的合理性、正确性和可信性。

鉴于保障效能仿真建模所需的数据粒度较细,而目前我军部队尚不重视对装备实际使用和维修保障数据的记录,因此,需要结合不同寿命阶段装备保障效能仿真建模粒度,规范数据采集要求,制定标准、完备的数据采集方案并建立一套有效的数据采集机制,从大量的外场使用数据中分析提取出真正有用的信息。

针对上述问题,本文提出以下数据采集方案:

(1) 下发数据采集表。这是最直接高效、也是最主要的一种数据采集方式,主要用于对使用保障数据、排故过程数据、周期性维修数据等各类详细数据进行收集。

(2) 收集部队已有统计数据。主要对已有的故障统计数据,以及装备构型数据、使用任务数据、保障设备/备件配置数据进行收集。

(3) 与部队人员访谈。适用于对各类问题进行收集确认,主要针对已填报的数据采集表中有较大出入、不一致的数据,向专业主任或专业师进行确认,并分析其可能的原因。此外,还可用于对排故较为复杂产品的排故流程数据收集确认。

2 模型构建

航空装备保障效能的影响因素众多,不仅包括可靠性、维修性、测试性、保障性等装备通用质量特性,也包括航空装备的部署规模、组成结构特点、任务模式、使用和维修保障过程等,还包括备件、保障设备、人力人员等保障资源的配置种类和数量等,因此,保障效能仿真建模具有很大的复杂性。为了实现对航空装备保障效能的有效评估,需要在ILSLab-Sims软件中对其相关影响因素的建模方法进行研究。

2.1 任务建模

任务模型是整个仿真运行的驱动器。通过对装备基本作战单元在一段日历时间内执行的使用任务进行描述,在执行任务的过程中产生装备使用和维修保障的需求,从而

驱动保障系统的运行,并完成对装备保障能力的评估。

对航空装备要执行的任务进行建模研究,应围绕航空装备的典型任务剖面,以装备的任务模式为建模对象,重点描述任务强度、任务发生时机、所需装备数量及配置、任务时序、任务之间逻辑关系、任务结构等内容。

2.2 装备建模

装备模型是仿真评估的主体对象。对航空装备的功能结构及其组成单元特性进行建模研究,应包括装备群数量、装备功能构型、各功能单元的RMTS属性等内容。

2.3 保障资源建模

保障资源模型是仿真评估的主要约束,是影响装备完好率的重要因素。对装备使用和维修保障过程中所需的保障资源种类与配置数量进行建模研究,主要包括备件、保障设备/工具、人力人员、技术资料等。

2.4 保障过程建模

保障过程模型是仿真评估的核心模型,包括使用保障过程模型、预防性维修保障过程模型和修复性维修过程模型,其对真实情况的描述程度直接决定了仿真评估结果与实际统计结果的符合程度。对装备的使用与维修保障流程,以及保障流程中涉及的维修时间、保障资源、保障组织等相关要素进行建模研究。

2.4.1 基于活动网络图的保障过程建模

由于航空装备保障过程中存在串行、并行、等待、选择等多种逻辑关系,作业过程还根据作业对象的不同存在着复杂的层次关系。因此,引入基于活动网络图的保障过程建模方法,对保障过程实现广泛的作业网络化控制建模,并将装备的任务计划、排故流程、保障资源配置、备件供应等各类要素有机地联系在一起。以修复性维修为例,其保障过程建模如图1所示。

2.4.2 基于Bootstrap方法的小子样维修时间分布拟合

在保障过程建模中,维修时间是个随机变量,在维修过程建模中是以分布的形式存在的,但实际中可获取的维修时间样本量很少,不满足经典统计理论中的样本量要求,难以直接对维修时间分布进行拟合。在实际维修时间统计样本数不是特别小的情况下(如10个以上),Bootstrap方法是较经典统计更为良好的非贝叶斯方法,它是一种较好的应用于自身信息的方法,而且在工程上易于实现。

设 $X_1, \dots, X_n$ 为*i.i.d*子样, $X_i \sim F(x)$, $\theta \sim \theta(F)$ 为总体分布的未知数,由 $X_1, \dots, X_n$ 做抽样分布函数 $F_n, \hat{\theta} \sim \hat{\theta}(F)$ 为 θ 的估计,记:

$$T_n = \hat{\theta}(F_n) - \theta(F) \quad (1)$$

从 F_n 中重新抽样,获得再生子样 $X^* = (X_1^*, \dots, X_n^*)$,由

X^* 做抽样分布,记做 F_n^* ,于是由 X^* 又可作出 θ 的估计 $\hat{\theta}(F_n^*)$,记:

$$R_n^* = \hat{\theta}(F_n^*) - \hat{\theta}(F_n) \quad (2)$$

R_n^* 为 T_n 的自助统计量,以 R_n^* 的分布去近似 T_n 的分布,这就是自助方法的中心思想.由于再生子样可以根据 F_n 重复产生,令:

$$X^{*(j)} = (X_1^{*(j)}, X_2^{*(j)}, \dots, X_n^{*(j)}), j=1, \dots, N \quad (3)$$

式(3)表示第 j 次再生子样.由每个 $X^{*(j)}$ 均可作出 R_n^* ,记为 $R_n^{*(j)}$,即:

$$R_n^{*(j)} = \hat{\theta}(F_n^{*(j)}) - \hat{\theta}(F_n), j=1, \dots, N \quad (4)$$

于是,对每个 $R_n^{*(j)}$,可以计算出 $\theta(F)$ 的近似取值,记为 $\theta^{(j)}(F)$,即:

$$\begin{aligned} \theta^{(j)}(F) &= \hat{\theta}(F_n) - T_n \\ &\approx \hat{\theta}(F_n) - R_n^{*(j)}, \quad j=1, \dots, N \end{aligned} \quad (5)$$

这样,得到未知参数 $\theta(F)$ 的 N 个可能取值.将其作为 $\theta(F)$ 的子样,由此可做出 $\theta(F)$ 的抽样分布 $F^*(\theta)$.由此出发,可以作出关于 θ 的统计推断.

3 基准模型校验及其应用方法

航空装备保障效能仿真基准模型的有效性是确保保障效能仿真评估业务进入型号工程的关键,它直接决定了仿真评估结果的准确性和可信性.本文在借鉴美军LCOM模型有效性校验方法的基础上,对航空装备保障效能仿真基准模型的校验方法 and 应用方法进行的研究,如图2所示.

航空装备保障效能仿真基准模型的校验方法主要可分为以下几个步骤:

(1) 收集飞机实际使用和维修保障数据,建立完善的保

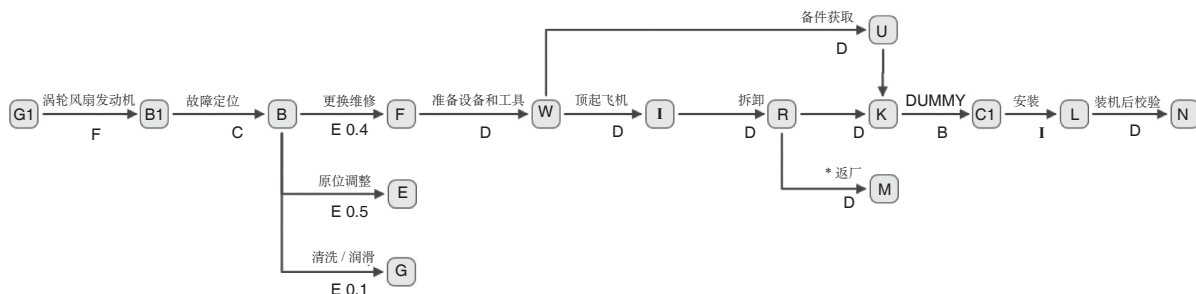


图1 修复性维修保障过程

Fig.1 Corrective maintenance support progress

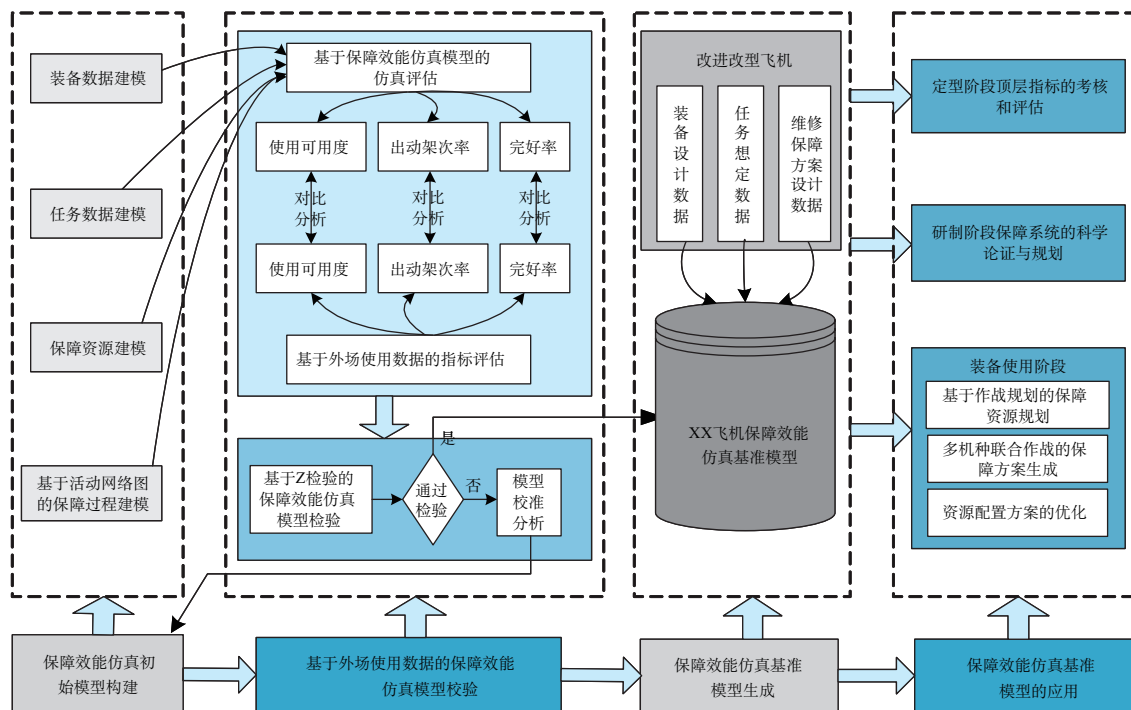


图2 保障效能仿真基准模型校验与应用方法

Fig.2 Support effectiveness simulation benchmark model verification and application method

障效能仿真初始模型。

(2) 根据实际作训任务制定仿真方案,基于Z检验将仿真评估结果与实际统计结果进行对比完成模型校验:

(a) 收集效能指标实际统计结果,计算 $n(>30)$ 次仿真结果的平均值与标准差;

(b) 假设:仿真结果=实际统计结果;

(c) 构造检验统计量,在选定的显著水平 P 值下校验仿真模型的有效性;

(d) 执行结果判定,接受假设说明仿真模型是有效的,拒绝假设则需要继续修改模型。

(3) 通过假设检验的模型生成该型航空装备的保障效能仿真基准模型。

(4) 利用这些保障效能仿真基准模型,后续改进改型航空装备只需梳理出其与相应保障效能仿真基准模型在产品组成及RMTS设计数据、保障资源配置数据等方面的差异,并对相应的保障效能仿真基准模型进行修正,即可用于这些改进改型航空装备的研制、定型和使用阶段。

4 应用案例分析

以某型飞机为例,基于现役飞机的外场使用数据,构建该系列飞机的保障效能仿真基准模型,在此基础上,结合该系列新研飞机的改进需求,分析新研飞机关键系统(包括雷达系统、电子对抗系统、发动机等因素)的调整与改进对完好率的影响。

假设某飞行团共有16架飞机,在10个月内共完成了3200个小时的飞行任务。遵循上述年度飞行总时间和任务编排原则,在仿真中进行如下任务编排:仿真总时间为10个月/43周/301天,以一周7天为周期对飞行任务进行平均安

排,每周安排38次飞行任务,76个飞行小时(每次飞行任务执行需要2架飞机,任务时长为1小时)。

根据仿真任务想定,在301天的仿真周期内,共计安排了 $43 \times 76 = 3268$ 个飞行小时的任务,与该飞行团实际3200个飞行小时的任务强度基本保持一致。

现役飞机各LRU的平均故障间隔飞行时间(MFHBFI)水平根据实际统计值进行计算,备件和保障设备配置数量参考该飞机的保障方案。

在上述仿真数据分析基础上,综合考虑备件周转时间的影响(根据调研结果,大部分产品的周转时间为40天,发动机周转时间为4个月左右),在保障效能仿真软件ILSLab-Sims中构建相应的任务模型、装备模型、保障过程模型、保障资源模型。进行30次保障效能仿真评估,30次仿真统计完好率平均值为91.54%,在0.95的置信度水平下,得到的完好率仿真区间估计结果为[90.38%,92.70%],以周为统计单位的仿真区间估计结果曲线如图3所示。

根据统计结果,该飞行团年度上报的完好率统计值为90.42%,将仿真计算结果跟实际统计结果进行校验:取显著水平 $P=0.5$,计算检验统计量 $Z=0.936$,可得校验结果为 $-1.96=Z_{0.025}<Z<Z_{0.975}=1.96$,即仿真结果通过校验。从而,将该保障效能仿真模型作为该系列飞机的保障效能仿真基准模型。

利用该系列飞机保障效能仿真基准模型,针对新研飞机设计改动较大的系统开展有针对性的仿真方案分析,并分析相关因素对装备完好率的影响,仿真结果如表1所示。

根据仿真分析结果,新研飞机在对雷达和电子对抗系统进行重大调整,以及换装国产发动机后,其完好率水平与现役飞机相比将出现大幅度下降,其中,换装国产发动机是最

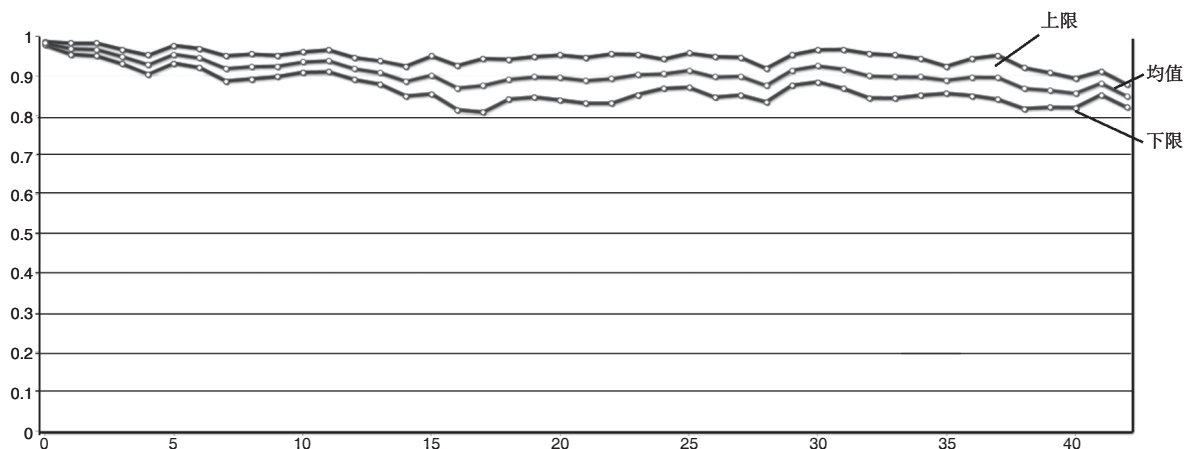


图3 现役飞机完好率仿真结果
Fig.3 Active aircraft readiness simulation result

表1 新研飞机仿真方案评估
Table 1 New developed aircraft simulation plan evaluation

仿真方案	雷达可靠性	电子对抗可靠性	发动机			完好率
			可靠性	排故时间	周转时间	
初始方案	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	12 <i>H</i>	120 <i>D</i>	91.54%
方案1	2 <i>X</i>	0.28 <i>Y</i>	—	—	—	92.08%
方案2	—	—	0.6 <i>Z</i>	24 <i>H</i>	180 <i>D</i>	67.81%
方案3	2 <i>X</i>	0.28 <i>Y</i>	0.6 <i>Z</i>	24 <i>H</i>	180 <i>D</i>	68.47%

为关键的影响因素,敏感程度最高,而造成这一结果的主要原因是国产发动机的可靠性水平低及其周转时间长导致的。

5 结论

本文结合保障效能仿真建模数据需求提出了一套完备的使用数据采集方案,有效解决了当前保障效能仿真应用过程中存在的数据缺失问题。根据该方法构建的航空装备保障效能仿真基准模型,不仅可以用于装备设计定型阶段综合保障效能指标的验证考核,而且可以进一步拓展到航空装备全寿命周期的各个阶段。在本次研究的基础上,后续还可结合导弹、舰船、车辆等其他军兵种装备的装备特点、任务特点、使用特点和维修保障流程特点,研究保障效能仿真软件ILSLab-Sims的功能扩展和升级,扩大装备保障效能仿真基准模型的对象范围,针对面向由空、天、海、陆装备构成的装备体系,形成各型装备的保障效能仿真基准模型。

AST

参考文献

[1] 辛文逵. 航空装备维修保障仿真技术 [C] // 航空装备保障技术及发展—航空装备保障技术专题研讨会论文集. 北京:国防工业出版社,2006.
XIN Wenkui. Aviation equipment maintenance support simulation technology [C] // Aviation equipment maintenance technology and development – Papers from aviation equipment maintenance technology symposium. Beijing: National Defence Industry Press, 2006. (in Chinese)

[2] 李惊. 建模与仿真技术在航空装备保障中的应用[C] // 2011航空维修理论研究及技术发展学术交流会议论文集. 2011, 269-272.
LI Jing. Application of modeling and simulation technology in aviation equipment support [C] // Paper from 2011 academic

exchange of aviation maintenance theory research and technology development. 2011, 269-272. (in Chinese)

[3] 张宝珍. 国外新一代战斗机综合保障工程实践[M]. 北京:航空工业出版社,2014:395-438.
ZHANG Baozhen. Engineering practice of foreign new generation fighters' integrated logistics support [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014: 395-438. (in Chinese)

[4] 刘晓东,张恒喜,尚柏林. 装备综合保障模型及应用综述[J]. 指挥技术学院学报,2001, 12: 69-72.
LIU Xiaodong, ZHANG Hengxi, SHANG Bolin. A synthesize study on integrated logistics support models and its application [J]. Journal of Institute of Command and Technology, 2001, 12: 69-72. (in Chinese)

[5] Eugene R R. Logistics composite model(LCOM)-a primer aeronautical systems division [M]. Wright-Patterson AFB. NAECON, 1994.

[6] Eugene R R. Building and operating the logistics composite model for new weapon systems part [R]. ASD-TR-82-5033, 1983.

[7] 何成铭,曹军海. 装备保障中的建模与仿真技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
HE Chengming, CAO Junhai. Modeling and simulation technology in equipment support [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005. (in Chinese)

[8] 章文晋. 任务驱动的综合保障建模框架研究[D]. 北京航空航天大学,2004.
ZHANG Wenjin. Research on task-driven integrated logistics support modeling framework [D]. Beihang University, 2004. (in Chinese)

[9] 张涛. 装备使用阶段维修保障能力评估建模与分析[D]. 长沙:国防科学技术大学,2004.
ZHANG Tao. Modeling and analysis of maintenance support

capability assessment of equipments in the usage phase [D].

Changsha: National Defence Industry Press, 2004. (in Chinese)

- [10] Zhou Y, Zeng Z Y, Zhou Y. Maintenance support process modeling and simulating technology for aviation materiel[J]. 10th International Conference on Reliability, Maintainability & Safety, 2014.

作者简介

周岩(1988—) 男,硕士,工程师。主要研究方向:保障效能仿真评估、综合保障。

Tel: 15011580850

E-mail: zhouyan_buaa@163.com

The Construction Method of Aviation Equipment Support Effectiveness Simulation Benchmark Model Based on Use Data

ZHOU Yan*, ZENG Zhaoyang, ZHOU Yang, JIA zhiyu, YUAN Kai

Integrated Support Department, AVIC China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China

Abstract: Aiming at the situation that no good result has achieved in application since the introduction of support effectiveness simulation technology, innovatively presented using actual use data to construct the support effectiveness simulation benchmark model of aviation equipment. Firstly, based on the independent researched and developed simulation platform ILSLab-Sims, proposed a set of comprehensive data acquisition plan, and then gave a method to establish aviation equipment support effectiveness simulation model based on analysis of aviation equipment maintenance support process. Moreover, for the target of materiel readiness rates, came up with the simulation benchmark model verification method based on Z test. Finally, taking a certain type of aviation materiel as example, validated the effectiveness of the benchmark model construction method, and made a further application analysis.

Key Words: simulation benchmark model; aviation equipment; support effectiveness simulation; use data

Received: 2015-09-30; Revised: 2015-10-09; Accepted: 2015-12-14

*Corresponding author. Tel. : 15011580850 E-mail: zhouyan_buaa@163.com