

反导装备维修体制的 Monte - Carlo 仿真

陈士涛¹, 李 强², 杨建军¹, 邓铁柱³

(1. 空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051; 2. 空军工程大学训练部, 陕西西安, 710051; 3. 空军驻航天二院 206 所军代室, 北京, 100854)

摘要 定义反导装备在不同维修体制下的战备完好性, 介绍战备完好率的计算方法。构建装备维修延误时间模型, 以维修延误时间作为衡量维修体制对战备完好性影响的标准。利用 Monte - Carlo 方法对模型进行仿真, 得到规定战备完好率下不同维修体制对维修延误时间的要求。对 MTBF 和 MTTR 进行敏感性分析, 验证确定的参数变化范围是合理的。仿真结果表明: 2 级维修体制在提高反导装备的战备完好性方面更具有优越性, 该结论可以为反导装备维修体制的建立提供建议和参考。

关键词 维修体制; 战备完好性; 敏感性分析

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.04.011

中图分类号 TJ760.7 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)04-0051-05

反导装备维修体制是指为实施反导装备维修工作而确定的组织体系和制度的总称, 主要包括各级维修机构的设置、构成、编制、隶属关系和任务划分等内容^[1]。反导装备要求 24 h 担负战备值班任务, 主要设备处于开机状态, 并需要能够在较短时间内转入战斗状态, 对战备完好性要求较高; 装备采用集成化、模块化和互换性设计, 广泛使用大规模集成电路技术和机内测试技术。基于装备设计和使用等方面的特点, 反导装备对维修保障提出了更高要求, 应建立与之相适应的维修体制。

1 反导装备的战备完好率

战备完好性指军事单位接到作战命令时, 实施其作战计划的能力, 它是在编实力、产品可用性、保障性的函数^[2]。战备完好性的概率度量称为战备完好率, 表示当要求投入作战时, 装备能够执行任务的概率^[3]。战备完好性体现在装备寿命剖面中的战备值班过程, 若装备不担负战备值班, 如处于封存状态时, 就不能体现战备完好性^[4]。反导装备 24 h 保持战备值班状态, 因此选取战备完好率作为衡量指标是合理的。定义反导装备完全在基层级、中继级或基地级维修的战备完好率分别为 p_1 、 p_2 和 p_3 (如果实行 2 级维修体制, $p_2 = 0$), 则有:

$$p_1 = \frac{T_{BF}}{T_{BF} + M_{ct} + M_{FD1} + M_{LD1}} \quad (1)$$

式中: T_{BF} 为平均故障间隔时间 MTBF; M_{ct} 为平均修复时间 MTTR; M_{FD1} 为基层级平均故障检测时间; M_{LD1} 为基层级平均后勤延误时间 MLDT。

$$p_2 = \frac{T_{BF}}{T_{BF} + M_{ct} + M_{FD1} + M_{FD2} + M_0 + M_{LD2}} \quad (2)$$

式中: M_{FD2} 为中继级平均故障检测时间; M_0 为后送到中继级维修的平均往返运输时间; M_{LD2} 为中继级平均后勤延误时间。

* 收稿日期: 2011-08-30

作者简介: 陈士涛(1984-), 男, 黑龙江桦南人, 博士生, 主要从事装备发展论证与体系规划研究。

E-mail: chenshitao311@163.com

$$p_3 = \frac{T_{BF}}{T_{BF} + \overline{M}_{ct} + \overline{M}_{FD1} + \overline{M}_{FD2} + \overline{M}_0 + \overline{M}_{LD3}} \quad (3)$$

式中: \overline{M}_{LD3} 为基地级平均故障检测时间; \overline{M}_0 为后送到基地级维修的平均往返运输时间; \overline{M}_{LD3} 为基地级平均后勤延误时间。

2级维修体制下,基地级的支援维修和远程技术支持部分并入 p_1 ,反导装备战备完好率为:

$$p = p_1 k + p_3 (1 - k) \quad , \quad p_3 < p_1 \quad (4)$$

式中 k 为2级维修体制下基层级的维修比例。

3级维修体制下反导装备战备完好率为:

$$p = p_1 k_1 + p_2 k_2 + p_3 (1 - k_1 - k_2) \quad , \quad p_3 < p_2 < p_1 \quad (5)$$

式中: k_1 为3级维修体制下基层级的维修比例; k_2 为3级维修体制下中继级的维修比例。

2 装备维修延误时间模型

将 \overline{M}_{ct} 、 \overline{M}_{FD} 、 \overline{M}_0 、 \overline{M}_{LD} 之和定义为反导装备不工作时间 T_0 ,再定义维修延误时间 $T = T_0 = \overline{M}_{ct} - \overline{M}_{FD}$,即除测试时间和维修实际消耗时间的武器系统不工作时间。以维修延误时间作为比较不同维修体制优劣性的标准,则有:

1) 设2级维修体制下,基层级和基地级的维修延误时间分别为 T_1 、 T_2 ,则:

$$T_1 = \frac{T_{BF}}{p_1} - T_{BF} + \overline{M}_{ct} - \overline{M}_{FD1} \quad (6)$$

$$T_2 = \frac{T_{BF}}{p_3} - T_{BF} + \overline{M}_{ct} - \overline{M}_{FD1} - \overline{M}_{FD2} \quad (7)$$

可得,反导装备维修延误时间为 $T = T_1 + T_2$ 。由于故障部件只能在基层级或基地级其中之一维修,则 T_1 和 T_2 必有一个值为零。

2) 设3级维修体制下,基层级、中继级和基地级的维修延误时间分别为 T'_1 、 T'_2 和 T'_3 ,则:

$$T'_1 = \frac{T_{BF}}{p_1} - T_{BF} + \overline{M}_{ct} - \overline{M}_{FD1} \quad (8)$$

$$T'_2 = \frac{T_{BF}}{p_2} - T_{BF} + \overline{M}_{ct} - \overline{M}_{FD1} - \overline{M}_{FD2} \quad (9)$$

$$T'_3 = \frac{T_{BF}}{p_3} - T_{BF} + \overline{M}_{ct} - \overline{M}_{FD1} - \overline{M}_{FD2} - \overline{M}_{FD3} \quad (10)$$

可得,反导装备维修延误时间为 $T' = T'_1 + T'_2 + T'_3$ 。由于故障部件只能在基层级、中继级或基地级其中之一维修,则 T'_1 、 T'_2 和 T'_3 只有一个值不为零。

3 仿真分析

3.1 仿真说明

1) 反导装备的基层级维修机构实行技术与指挥相分离,有专门的维修分队,其维修能力比传统的基层级更强^[5];

2) 将战备完好率作为约束条件,仿真结果为满足规定战备完好率的维修延误时间要求,相同战备完好率下维修延误时间要求越宽松说明维修体制越合理;

3) 由于反导装备24 h保持战备值班状态,仿真过程中武器系统运行时间等项目可约简;

4) 仿真变量包括:故障件后送维修的运输能力 \overline{M}_0 ;可靠性指标 T_{BF} ;维修性指标 \overline{M}_{ct} ;测试性指标 \overline{M}_{FD} 。

3.2 仿真条件

以反导装备C波段固态有源相控阵雷达为研究对象,参照THAAD的X波段雷达和地空导弹武器系统C波段制导雷达可靠性、维修性和测试性的相关数据。统计分析地空导弹武器系统雷达系统230个元器件的 T_{BF} 、 \overline{M}_{ct} 和 \overline{M}_{FD} 值,并考虑到制造工艺的发展和先进技术的应用可以提升反导装备的“三性”指标,最终确

定仿真变量区间范围如下(时间以 h 计):

1)3 级维修体制:① T_{BF} 为(5 000, 125 000);② \bar{M}_{ci} 为基层级(0.1, 1)、中继级(0.5, 10)、基地级(5, 15);③ \bar{M}_{FD} 为基层级(0.1, 0.5)、中继级(0.5, 4)、基地级(2, 8)。

2)2 级维修体制:① T_{BF} 为(5 000, 125 000);② \bar{M}_{ci} 为基层级(0.1, 1)、基地级(1, 15)、③ \bar{M}_{FD} 为基层级(0.1, 1.5)、基地级(1.5, 8)。

参考相关资料和地空导弹装备维修保障相关数据^[6-7],确定反导装备 3 级维修体制下基层级、中继级和基地级的维修比例为 0.7:0.2:0.1。实行 2 级维修体制,基层级的维修任务将有所加重,基层级和基地级的维修比例为 0.85:0.15。

3.3 仿真过程

利用 Monte - Carlo 方法对维修延误时间模型仿真^[8-9],仿真次数定为 1 000 次,得到 2 种维修体制下规定战备完好率对维修延误时间的要求。以 3 级维修体制为例维修延误时间仿真过程见图 1。

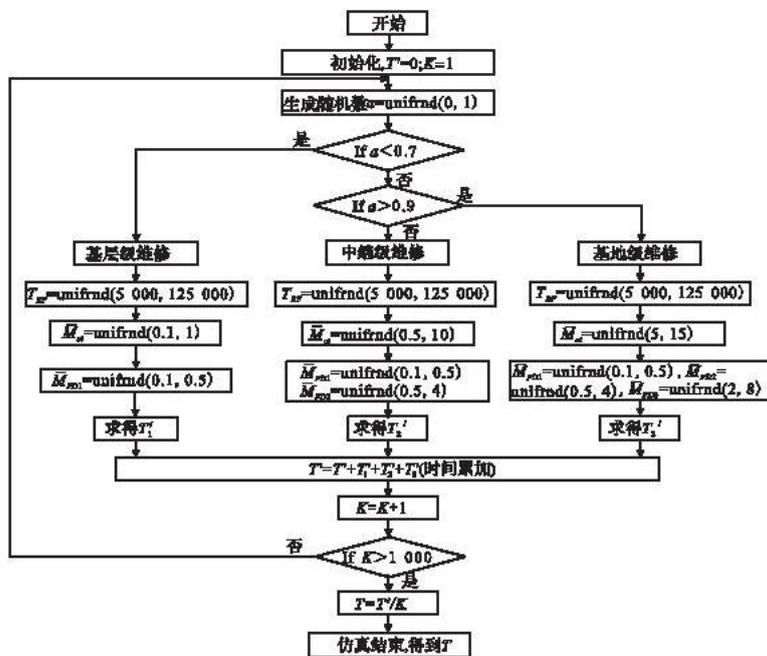


图 1 3 级维修体制维修延误时间仿真流程图

Fig.1 Simulating flow chart of repair delay time under third - level maintenance

1)生成一个(0, 1)之间均匀分布的随机数,通过判断随机数的大小,确定基层级、中继级和基地级 0.7:0.2:0.1 的维修比例;

2)在已确定的各维修级别 T_{BF} 、 \bar{M}_{ci} 和 \bar{M}_{FD} 区间范围内各生成一个均匀分布的随机数,以此作为仿真中部件的相关维修参数;

3)利用式(8) - (10)计算相应的装备维修延误时间 T'_1 、 T'_2 或 T'_3 ;

4)通过多次仿真,累加装备的维修延误时间 $T' = T'_1 + T'_2 + T'_3$;

5)对 T 算术平均处理, $T = T'/K$, 得到 3 级维修体制下规定战备完好率的维修延误时间最大允许值。

2 级维修体制维修延误时间仿真过程与 3 级维修体制仿真过程基本相同。

3.4 仿真结果

经过仿真计算,3 级维修体制和 2 级维修体制在战备完好率为 90% 时,维修延误时间最大允许值分别为 53.303 6 h 和 98.551 6 h,即当 3 级维修体制的维修延误时间小于 53.303 6 h,或 2 级维修体制的维修延误时间小于 98.551 6 h 时,战备完好率可达到 90% 以上;当战备完好率为 95% 时,维修延误时间最大允许值分别为 17.095 6 h 和 42.153 7 h;当战备完好率为 98% 时,维修延误时间最大允许值分别为 2.715 3 h 和 9.341 8 h;当战备完好率为 99% 时,维修延误时间最大允许值分别为 0.829 1 h 和 1.888 4 h。对比可知:战备完好率要求越高,对维修延误时间的要求越严格;相同战备完好率要求下,2 级维修体制对维修延误时间的要求较宽松。

从另一个方面理解,当维修延误时间相同时,2 级维修体制下的装备战备完好率更高。即在维修延误时

间无法进一步减小的条件下,由于维修体制简化可以使战备完好率进一步提高。从维修延误时间和战备完好性角度,2级维修体制较3级维修体制更优越。这是由于:①反导装备中大量应用高新技术,使武器系统呈现出不同的技术特点,直接影响装备维修工作,2级维修体制更适应装备技术特点和维修任务要求;②针对反导装备作战使用特点,2级维修体制更能满足战备完好性和维修时效性的要求;③维修技术的应用,改变了反导装备的维修模式,建立2级维修体制有利于实现维修活动的高效组织和快速响应。

3.5 敏感性分析

模型仿真是在参考相近装备和相关资料,对 T_{BF} 和 \overline{M}_{cl} 作一定区间范围约束后进行的,对于可靠性指标和维修性指标的选取是否合理,需要利用敏感性分析进一步验证^[10]。

除 T_{BF} 的其它参数保持原定范围不变,设定各级维修机构的维修延误时间分别为 $T'_1 = 0.5$ h, $T'_2 = 2$ h, $T'_3 = 5$ h; $T_1 = 0.5$ h, $T_2 = 3$ h。对不同 T_{BF} 下的战备完好率随机标点,得到战备完好率随 T_{BF} 变化趋势见图2。

由图2可知, T_{BF} 值在(5 000, 125 000)之间时,基本包括了反导装备战备完好率30% - 99%的范围, T_{BF} 的范围设定是合理的。

除 \overline{M}_{cl} 的其他参数保持原定范围不变,对不同 \overline{M}_{cl} 下的战备完好率随机标点,得到战备完好率随 \overline{M}_{cl} 变化趋势见图3。

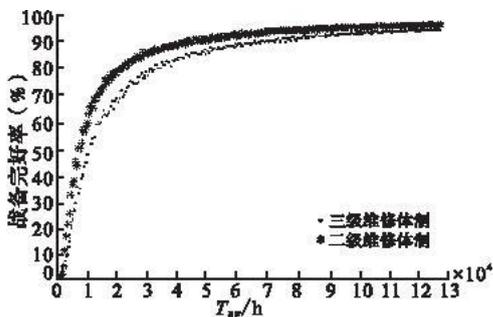


图2 不同维修体制下战备完好率随 T_{BF} 变化趋势

Fig.2 Operational readiness rates change with T_{BF} under different maintenance systems

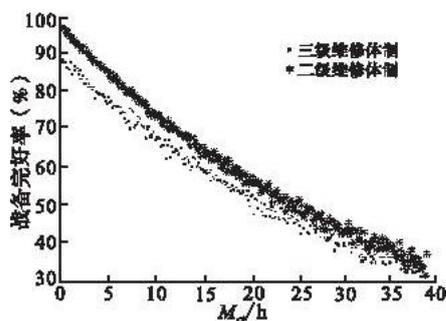


图3 不同维修体制下战备完好率随 \overline{M}_{cl} 变化趋势

Fig.3 Operational readiness rates change with \overline{M}_{cl} under different maintenance systems

由图3可知, \overline{M}_{cl} 值在(0.1, 15)之间时,反导装备战备完好率保持60%以上。随着 \overline{M}_{cl} 继续增大,战备完好率分布逐渐稀疏,误差变大,模型准确性降低,取更大的 \overline{M}_{cl} 范围已没有意义,本文的范围设定是合理的。

4 结束语

目前对于其维修体制建立的定性分析较多,但仍缺乏足够的定量说明。本文的装备维修延误时间模型及其仿真过程提供了一种衡量不同维修体制优劣性的方法,从仿真角度定量说明了2级维修体制可以大大提高反导装备的战备完好率。论文结论可以为反导装备维修体制的建立提供参考。

参考文献:

- [1] 武洪文,齐晓慧,王新宇. 基于灰局势决策理论的维修级别分析方法[J]. 军械工程学院学报,2004,16(5):47-51.
WU Hongwen, QI Xiaohui, WANG Xinyu. Study on the general method to model based on the gray decision making theory in lora[J]. Journal of ordnance engineering college, 2004, 16(5): 47-51. (in Chinese)
- [2] GJB451A-2005. 可靠性维修性保障性术语[S]. 2005.
GJB451A-2005. Glossary of reliability, maintainability and supportability[S]. 2005. (in Chinese)
- [3] Hairong S, Jame J H. The failure of MTTF in availability evaluation[C]//Proceedings annual reliability and maintainability symposium. [S. l]:IEEE press,2002: 279-284.
- [4] Cochran J K, Lewis T P. Computing small fleet aircraft availabilities including redundancy and spares [J]. Computers & operations research, 2002, 29(1): 529-540.
- [5] 卢永吉,王远达,侯健. 军机维修体制发展方向及关键技术研究[J]. 飞机设计,2008,28(4):73-76.
LU Yongji, WANG Yuanda, HOU Jian. Research on the development direction and key technologies of maintenance system for

- military aircraft[J]. Aircraft design,2008, 28(4): 73 - 76. (in Chinese)
- [6] 王远达,宋笔锋,姬东朝. 军机航电系统实现两级维修的关键技术[J]. 火力与指挥控制,2009,34(8):141 - 144.
WANG Yuanda, SONG Bifeng, JI Dongchao. Research on key technologies for the two level maintenance of military aircraft avionics system[J]. Fire control & command control,2009, 34(8): 141 - 144. (in Chinese)
- [7] 卢永吉,王远达,刘扬. 地空导弹系统维修体制优化研究[J]. 航空兵器,2008,12(6):63 - 66.
LU Yongji, WANG Yuanda, LIU Yang. Research on the optimization of maintenance system for ground - to - air missile system[J]. Aero weaponry,2008, 12(6): 63 - 66. (in Chinese)
- [8] 刘义乐,曹钰,徐宗昌. 基于图论的装备维修仿真模型[J]. 系统工程理论与实践,2003,24(8):110 - 113.
LIU Yile, CAO Yu, XU Zongchang. Graph method - based model on the simulation of equipment maintenance process[J]. Systems engineering - theory & practice,2003, 24(8): 110 - 113. (in Chinese)
- [9] Gutina G, Rafieya A, Yea A. Level of repair analysis and minimum cost homomorphism of graphs[J]. Discrete appl math, 2006, 154(6): 881 - 889.
- [10] Richard C C, Ilyas M I. A generic model of equipment availability under imperfect maintenance[J]. IEEE transaction on reliability, 2005, 54 (4): 564 - 571.

(编辑:田新华)

Monte - Carlo Simulating for the Maintenance System of Antiballistic Missile Equipment

CHEN Shi - tao¹, LI Qiang², YANG Jian - jun¹, DENG Tie - zhu³

(1. School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Department of Training, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 3. The Military Representative office of PLA Assigned to the 206th Institute of CASIC, Beijing 100854, China)

Abstract: This paper defines the operational readiness of terminal high altitude antiballistic missile equipment under different maintenance systems, introduces how to calculate the operational readiness rates of equipment and establishing a repair delay time model. By utilizing the repair delay time to value the influence of maintenance systems on operational readiness rates is judged. Monte - Carlo method is used to simulate the model, and the demands of different maintenance systems on the repair delay time under the set operational readiness rates are got. The sensitivity analyses of MTBF and MTTR are made to validate that the parameter variety bound is reasonable. The results indicate that two - level maintenance is more beneficial to enhancing the operational readiness. The conclusion can be a reference for building terminal high altitude antiballistic missile equipment maintenance system.

Key words: maintenance system; operational readiness; sensitivity analysis