

### 基于系统动力学的装备维修级别决策研究

魏圣军, 吴法文, 张琳, 汪文峰, 张搏, 牛童

引用本文:

魏圣军, 吴法文, 张琳, 等. 基于系统动力学的装备维修级别决策研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(3): 51-56.

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. 基于AHP的轻武器装备维修保障能力评估

引用本文: 高健, 刘铁林, 冯兵, 等. 基于AHP的轻武器装备维修保障能力评估[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(3): 92-94, 142.

#### 2. 基于灰色理论的维修经费投入预测模型

引用本文: 李建华, 张雪胭, 王秀华, 等. 基于灰色理论的维修经费投入预测模型[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(1): 145-148.

#### 3. 基于ANFIS的装备维修保障能力生成度评估

引用本文: 王申坪, 李忠海, 李忠光, 等. 基于ANFIS的装备维修保障能力生成度评估[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(2): 10-13.

#### 4. 基层级装甲装备维修经费需求研究

引用本文: 吕维振, 张雪胭, 郑国禹. 基层级装甲装备维修经费需求研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016(8): 77-79, 108.

#### 5. 基于B/S构架的装备维修设备品质管理系统设计

引用本文: 梁春燕, 张仰森, 向红军. 基于B/S构架的装备维修设备品质管理系统设计[J]. 兵器装备工程学报, 2016(8): 80-83.

# 基于系统动力学的装备维修级别决策研究

魏圣军, 吴法文, 张琳, 汪文峰, 张搏, 牛童

(空军工程大学 研究生院, 西安 710051)

**摘要:**针对装备维修合理决策的问题,提出了一种基于系统动力学的装备维修级别决策方法。从人力资源系统角度,构建了支地空导弹武器装备援抢修系统系统动力学模型,仿真结果给出了合理选择维修体制的时机和条件,可为科学有效开展地空导弹武器装备支援抢修工作提供依据。

**关键词:**装备维修;系统动力学;SD模型

**本文引用格式:**魏圣军,吴法文,张琳,等.基于系统动力学的装备维修级别决策研究[J].兵器装备工程学报,2020,41(03):51-56.

**Citation format:**WEI Shengjun, WU Fawen, ZHANG Lin, et al. Equipment Maintenance Level Decision-Making Based on System Dynamics[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(03): 51-56.

**中图分类号:**E92

**文献标识码:**A

**文章编号:**2096-2304(2020)03-0051-06

## Equipment Maintenance Level Decision-Making Based on System Dynamics

WEI Shengjun, WU Fawen, ZHANG Lin, WANG Wenfeng, ZHANG Bo, NIU Tong

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** In view of making reasonable decisions of equipment maintenance, from the perspective of human resource system, the system dynamics model of support and emergency repair system for surface-to-air missile was constructed. The simulation results give the time and condition of selecting the maintenance system reasonably, which can provide the basis for carrying out the repair work of surface-to-air missile weapon and equipment.

**Key words:** equipment maintenance; system dynamics; SD model

装备的维修保障是使装备改善、恢复、保持规定的技术战术状态而实施的一切活动<sup>[1]</sup>。本世纪初,美国陆军依据未来战争和装备发展对维修保障的需求,开始研究论证推行装备维修工作体系由原来的四级维修体系向两级维修体系转型<sup>[2]</sup>。准确识别当今和将来不断出现的新技术及其在军事方面的应用,对未来战争发挥着越来越重要的作用,从而对军事能力结构变革和作战力形成产生重大影响<sup>[3]</sup>。地空导弹武器系统信息化程度高,装备故障自检要求严,现行维修

任务分工和作业体系维修已不适应维修保障要求。依据相关文件要求,将地空导弹装备维修作业体系由基层级、中继级、基地级三级维修调整为部队级、基地级二级维修。

通过对武器装备各项指标、数据的科学分析,联系部队实际情况,确定维修等级,选择最合理修理方案,科学制定最佳维修方式和维修周期,提高武器装备完好率和可靠性,极大的缩短装备修理时间,节约装备修理成本,延长武器装备使用周期<sup>[4]</sup>。就地空导弹雷达装备来说,单位基层级主要是

**收稿日期:**2019-04-10; **修回日期:**2019-05-27

**基金项目:**中国博士后科学基金项目(2017M623417)

**作者简介:**魏圣军(1983—),男,硕士研究生,工程师,主要从事装备论证研究。

**通讯作者:**张琳(1975—),男,博士,教授,主要从事保障信息化研究, E-mail:324180447@qq.com。



表1 变量的符号表示与定义

序号	变量类型	变量符号	变量含义
1	流量	OZXFSJ	三级体制下基层级故障总修复时间
2		IZXFSJ	三级体制下中继级故障总修复时间
3		DZXFSJ	三级体制下基地级故障总修复时间
4		TDZXFSJ	二级体制下基地级故障总修复时间
5		GZSJLJ	装备工作时间累计
6	流量	OXFSJ	单个周期内三级体制下基层级修复时间累计
7		IXFSJ	单个周期内三级体制下中继级修复时间累计
8		DXFSJ	单个周期内三级体制下基地级修复时间累计
9		TDXFSJ	单个周期内二级体制下基地级修复时间累计
10		YGZSJ	单个周期内装备工作时间累计
11	辅助变量	DGZSJBL	三级体制下基地级修复时间比例
12		DGZSJQW	三级体制下基地级修复时间期望值
13		DPJXFSJQW	三级体制下基地级平均修复时间期望值
14		DXFBL	三级体制下基地级修复故障次数比例
15		DXFCS	三级体制下基地级修复故障次数
16		GZCS	故障次数
17		GZSJQW	故障处理时间期望值
18		IDGZSJ	除基层级外故障处理时间期望值
19		IGZSJQW	三级体制下中继级故障处理时间期望值
20		IPJXFSJQW	三级体制下中继级故障平均修复时间期望值
21		IXFCS	三级体制下中继级修复故障次数
22		OXFCS	三级体制下基层级修复故障次数
23		TDPJXFSJQW	二级体制下基地级故障平均修复时间期望值
24		TDXFCS	二级体制下基地级修复故障次数
25		ZGZSJ	所有装备工作时间累计
26	常量	DTS	单个周期内工作天数
27		EGZSJ	每天的工作时间
28		GYKYDQW	固有可用度期望值
29		GZL	装备故障率
30		HLDYSL	一个中继级下火力单元数量
31		IXFBL	中继级修复故障次数比例
32		IXFSJBL	中继级故障处理比例
33		OXFBL	基层级修复故障次数比例
34	ISL	一个基地级下中继级数量	

### 3.1 仿真假设

1) 整个系统共 30 个火力单元,三级体制下分为:6 中继级维修机构,1 个基地级维修机构;二级体制则分为:30 个火力单元和 1 个基地级维修机构。

2) 在同一级的维修机构的不同维修人员修复能力水平一样,也就是对于故障的平均修理时间是相同的;但维修人员数量只对故障的等待修理时间有影响,对故障的处理时间没影响。

3) 假定目前的部队三级维修体制实际情况下,基层级约能修复全部故障的 60%,中继级 35%,基地级 5%,装备平均每天工作 2 h;基层级的平均故障修复时间不超过 0.5 h。

4) 两种体制都采用固有可用度来度量,固有可用度指标仅与修复性维修时间和工作时间有关的一种可用性参数<sup>[14]</sup>,本系统假设两种体制下的维修保障系统固有可用度指标都为  $A_i = 0.9$  的条件下进行比较分析,其固有可用度计算公式为<sup>[15]</sup>

$$A_i = \frac{T_{BF}}{T_{BF} + \bar{M}_{ct}} \quad (1)$$

式(1)中: $A_i$  表示固有可用度; $T_{BF}$  表示平均工作时间(h); $\bar{M}_{ct}$  表示平均修复时间,包括平均维修时间,行政管理时间及后勤延误时间(h)。

### 3.2 仿真分析

1) 系统平均无故障时间(MTBF)对两种体制下支援抢修系统的影响。在 MTBF 从 30 h 增加到 60 h 和支援抢修系统的修复比例不变的情况下,基层级的平均故障修复时间不变,随着 MTBF 的增加,三级体制下,各级支援抢修系统平均修复时间的变化,如图 3 所示。

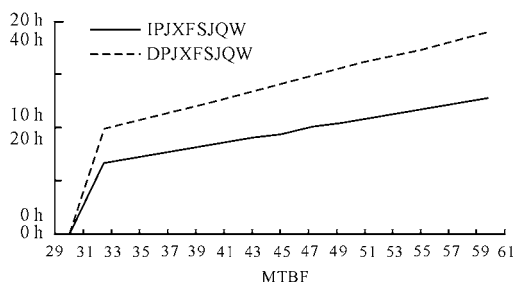


图3 三级体制下平均修复时间与 MTBF 的变化图

对于中继级支援抢修系统的平均修复时间的指标来说,在保持固有可用度一定的情况下,装备 MTBF 增加,单位周期内故障次数减少,在总的工作时间一定时,总的故障时间一定,所以平均修复时间就要增加,从图 3 中可以看出,MTBF 从 30 h 增加到 60 h,中继级平均修复时间要从 7 h 增加到 12 h 左右;基地级平均修复时间要从 18 h 增加到 38 h 左右,这对支援抢修系统的要求降低。

若采用二级维修体制,在基层级的修复能力约为 60% 的情况下,二级体制下的基地级平均修复时间与 MTBF 变化的

关系如图4所示。随着MTBF从30 h增加到60 h,二级体制下基地级平均修复时间从8 h增加到16 h左右,这样的指标要求对于基地级维修来说是很难满足的。根据目前基地级的抢修能力,一般来说,基地级距基层级约有1 000多 km,其平均修复时间都要在4 d(32 h)左右,所以这种情况下,如果采用二级维修体制,一要增加装备的平均无故障时间MTBF,提高装备的可靠性;二是增加基层级的修复能力,这样基地级的修复次数减少,在同样允许的修复时间条件下,基地级平均修复时间就会增加,符合基地级的要求;三是对基地级的修复手段进行改进,目前来说,基地级支援抢修,花在路途上的时间约有1/3,如果采用远程支援技术,可将路途时间全部节省,将会大大降低基地级的平均故障修复时间,使其满足二级体制的要求。

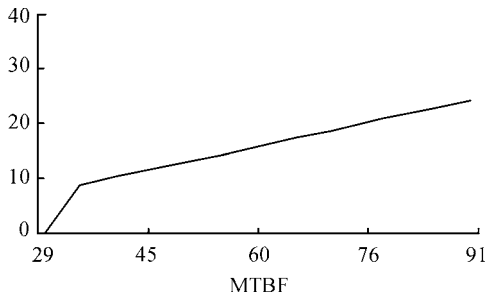


图4 二级体制下平均修复时间与MTBF变化图

2) 平均每天工作时间(EGZSJ)的影响。在装备平均无故障时间MTBF为50 h的情况下,平均每天工作时间从2 h到6 h的变化下,若采用三级体制,各级的平均修复时间指标变化如图5所示;二级体制的平均修复时间指标变化如图6所示。

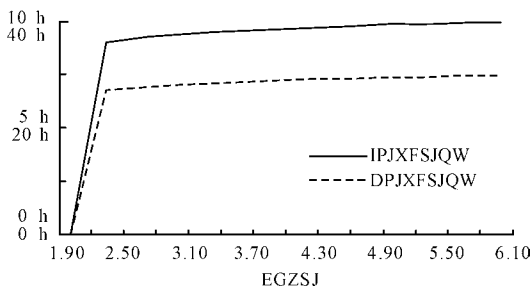


图5 三级体制下平均修复时间与EGZSJ的变化图

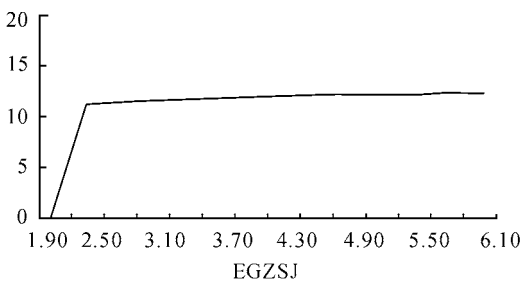


图6 二级体制下平均修复时间与EGZSJ的变化图

从图5和图6可以看出:随着平均每天工作时间EGZSJ的增加,两种体制下,各级的平均修复时间都有所增加,幅度都不大,这种上升的趋势可用固有可用度的定义来解释。将固有可用度定义公式进行变换可得:

$$\bar{M}_{ct} = \frac{(1 - A_I) T_{BF}}{A_I} \quad (2)$$

从式(2)可以看出:在三级体制下,随着EGZSJ的增加,中继级和基地级的平均修复时间指标都略有增加,较符合目前装备维修保障的实际;但在二级体制下,随着EGZSJ的增加,基地级平均修复时间指标略有增加,当EGZSJ为6 h时,二级体制的基地级平均修复时间指标最大值为13 h,就目前各基地级维修机构都不能满足此要求。

3) 修复比例的影响。新型装备中中继修复能力在减弱,基层级和基地级修复能力太强,所以就提出要向两级体制转变的趋势,这里就以修复比例来体现各级的修复能力,修复比例的计算公式为

$$P_o = \frac{C_o}{C_o + C_I + C_D} \quad (3)$$

式(3)中: $O$ 、 $I$ 和 $D$ 分别表示基层级、中继级和基地级; $C_o$ 表示基层级修复的故障次数, $I$ 和 $D$ 类推; $P_o$ 表示基层级修复比例, $I$ 和 $D$ 类推。

随着基层级修复比例OXFBL的增加,两种体制的平均修复时间指标变化如图7和图8所示,在OXFBL为0.8时,三级体制下,中继级平均修复时间指标要求达到16 h左右,基地级平均修复时间指标要求达到28 h左右,如图7所示;而在二级体制下,基地级平均修复时间指标要求达到30 h左右,这对于目前装备支援抢修系统来说是可以满足其要求的,也就是在OXFBL大于等于0.8时,可以采用二级体制。

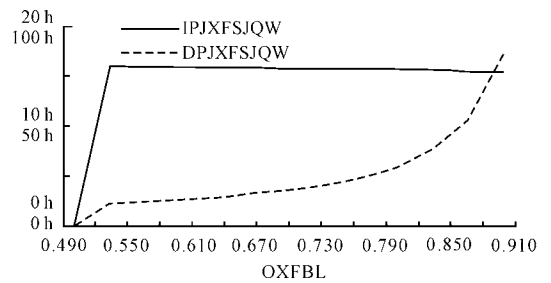


图7 三级体制下平均修复时间指标与OXFBL的变化关系图

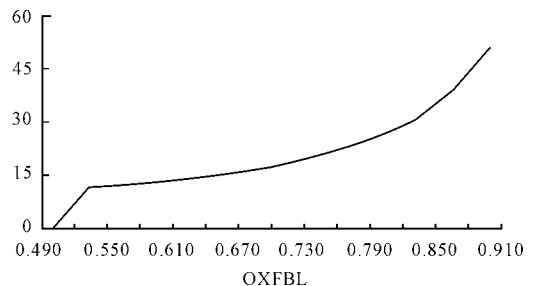


图8 二级体制下平均修复时间指标与OXFBL的变化关系图

4) 远程支援技术的影响。故障处理时间如图 9 所示。三级体制下,不同级别的维修机构对于装备故障处理时间都有一个平均值,比如说路途时间,中继级到基层级的平均距离约 200 km,平均花费 3 h,而基地级距基层级至少 1 000 km,一般要花一整天时间,这里就以一个工作日(8 h)为单程路途平均时间,这样可得中继级和基地级各项数据如表 2 所示。

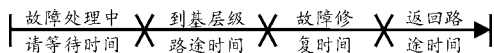


图 9 故障处理时间关系图

表 2 两级时间

维修级别	故障处理申请等待时间/h	到基层级路途时间/h	故障修复时间/h	返回路途时间/h	总计/h
中继级	0.5	3	2	3	8.5
基地级	1(0.5)	8	16	8	33(32.5)

注:括号内为二级体制下时间

从表 2 可以看三级体制下,中继级最小故障平均修复时间 8.5 h,基地级为 33 h。如果对传统的维修技术手段不进行改进的话,结合前面的分析,只有 OXFBL 大于等于 0.8 时,采用二级体制的基地级平均修复时间才能满足要求。分析上表 2,花在路途的时间约 50%,如果把路途时间节省下来,则采用二级体制更容易实现,可以采用远程支援技术,远程支援技术是武器装备维护保障领域发展十分迅速的一项技术,是随着高技术武器装备的大量使用和计算机网络通信技术的不断发展而产生的一种先进的装备保障手段<sup>[16]</sup>。它使一线技术人员与后方技术专家用网络紧密的联系在一起,为武器装备的管理提供及时、准确的指导。当一线技术人员遇到短时间内难以解决的故障时,可以通过互联网将装备的各种技术参数,传输给后方的技术专家,以求支援;后方的技术专家在进行分析研究后,迅速做出结论,并通过网络对前方的维护保障工作进行实时指导,协助前方人员迅速、准确地完成任务<sup>[17]</sup>。探讨应用这种技术,可以加快受损装备的维修时间,以提高武器装备的利用率,远程维修示意图如图 10 所示。

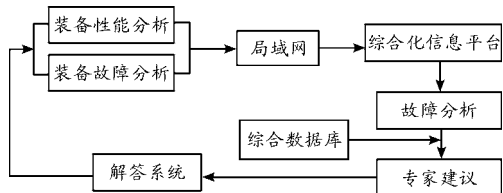


图 10 远程维修示意图

这里针对远程支援技术,提出一种远程支援技术因子,用百分比  $P_{YZJ}$  表示,它含义为有一定百分比  $P_{YZJ}$  的维修任务

可以通过远程支援技术来实施,这样,二级体制下,基地级的平均故障处理时间与远程支援技术因子的关系如图 11 所示,其最小处理时间是在  $P_{YZJ} = 1$  时,  $TDPJXFSJ_{\min} = 16.5$  h。

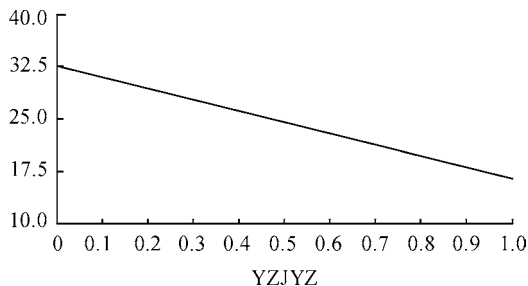


图 11 二级体制下基地级平均故障处理时间与  $P_{YZJ}$  的关系图

### 3.3 参数分析

在以上的系统中,努力提高一些参数,如基层级修复比例等,可以大大降低维修保障系统的指标要求,因此,模型具有一定的实用性。通过对 MTBF、EGZSJ、修复比例和远程支援技术的分析,综合考虑可得在采用二级体制下的装备 MTBF、EGZSJ、基层级修复比例 OXFBL 和远程支援技术之间的关系。

1) MTBF 与  $P_{YZJ}$  的关系。在图 5 中, OXFBL = 0.6, EGZSJ = 2, 只有在 MTBF  $\geq 60$  时,才能满足该要求  $TDPJXFSJ \geq TDPJXFSJ_{\min}$ , 实行二级体制。因此分析在  $60 \leq MTBF \leq 120$  间  $P_{YZJ}$  的关系图,如图 12,从图中可看出不同的 MTBF 对  $P_{YZJ}$  的最低要求值, MTBF 越大,对远程支援技术要求就越低。

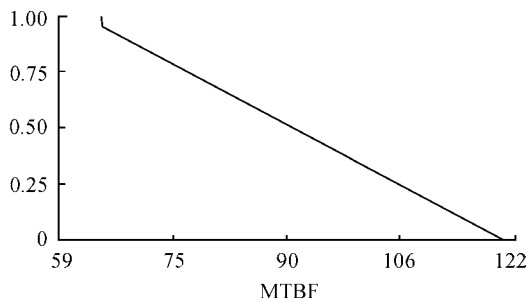


图 12  $P_{YZJ}$  与 MTBF 的关系图

2) EGZSJ 与  $P_{YZJ}$  的关系。从图 8 中可以看出, OXFBL = 0.6, MTBF = 50, 随着 EGZSJ 增大,其 TDPJXFSJ 都小于  $TDPJXFSJ_{\min}$ , 所以,只有改善 OXFBL 和 MTBF 参数,才能实行二级体制。

3) OXFBL 与  $P_{YZJ}$  的关系。OXFBL 与  $P_{YZJ}$  的关系如图 13 所示, MTBF = 50, EGZSJ = 4, 在 OXFBL < 0.68 时,  $TDPJXFSJ < TDPJXFSJ_{\min}$ , 不能实行二级体制;在  $0.68 \leq OXFBL \leq 0.84$  间,需要远程支援技术;在 OXFBL > 0.84 时,  $TDPJXFSJ > 32.5$ , 没有远程支援技术也能满足要求,可以实行二级体制。

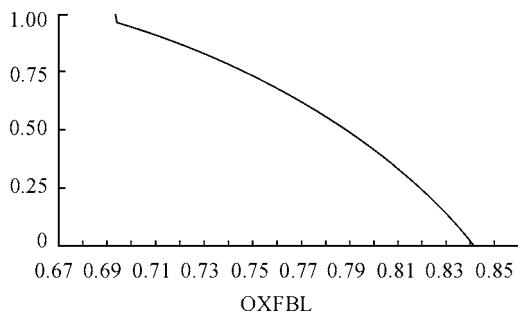


图 13 OXFBL 与  $P_{VZJ}$  的关系

## 4 结论

地空导弹武器装备作为典型的复杂装备系统,其抢修任务之间存在着关联性和约束性,抢修任务分配问题具有一定的特殊性和复杂性,只有在充分考虑装备的 MTBF、OXFBL 和  $P_{VZJ}$  的实际情况下,才能选择合适的维修体制。

## 参考文献:

- [1] 于洪敏. 装备维修保障评估理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社,2015.
- [2] 王志勇,曹奕,侯岳. 美军现行二级维修体制对我军装备维修保障的启示[J]. 装备学术,2013(2):79-80.
- [3] 张博,张琳,汪文峰,等. 美国国防部颠覆性技术管理探析[J]. 战术导弹技术,2018(1):60-64.
- [4] 王海波. 关于新装备技术保障的思考[J]. 内燃机与配件,2018(6):134-135.
- [5] 钟永光,贾晓菁,钱颖,等. 系统动力学[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2015.
- [6] 张波,虞朝晖,孙强,等. 系统动力学简介及其相关软件

综述[J]. 环境与可持续发展,2010(2):1-4.

- [7] 陈国卫,金家善,耿俊豹. 系统动力学应用研究综述[J]. 控制工程,2012,19(6):921-928.
- [8] 马国丰,陆居一. 国内外系统动力学研究综述[J]. 经济研究导刊,2013(6):218-220.
- [9] 王兆威,阳平华. 基于系统动力学的军事供应链联合库存管理研究[J]. 军事运筹与系统工程,2013,27(2):47-49.
- [10] 王东辉,韩剑,流洪坤,等. 基于系统动力学的弹药库存控制模型及应用[J]. 兵器试验,2013(3):40-43.
- [11] 王欣,左忠义. 基于系统动力学的高铁安全管理[J]. 中国安全科学学报,2013,23(10):158-162.
- [12] 刘晓然,苏经宇,王威,等. 城市抗震防灾能力评估的系统动力学模型[J]. 自然灾害学报,2013,22(5):71-76.
- [13] 徐磊,汪文峰,杨建军. 基于系统动力学的防空装备战时维修保障系统仿真[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2009(4):43-47.
- [14] 陈光宇,李婧. 时间约束下可修机群的任务可用性建模方法研究[J]. 电子科技大学学报,2014,43(6):943-949.
- [15] 甘茂治,康建设,高崎,等. 军用装备维修工程学[M]. 2版. 北京:国防工业出版社,2010:212.
- [16] 于凤竺,高国华,赵冰. 基于B/S的装备保障远程技术支持系统设计与实现[J]. 现代电子技术,2015(21):49-51.
- [17] 李科,张军冬,胡金华. 海军装备维修远程技术支持系统体系架构[J]. 舰船电子工程,2011(8):133-134.

科学编辑 陈小卫 博士(航天工程大学讲师)

责任编辑 周江川