

# 基于系统动力学的防空装备战时维修保障系统仿真

徐磊, 汪文峰, 杨建军  
(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘要:** 装备战时维修保障问题是当前的热点问题,为解决现有仿真模型多为局部单类装备的描述,没有从体系对抗的角度进行分析和研究的问题,通过对战时防空装备维修保障系统的分析,构建了系统因果关系图和系统流图;运用系统动力学仿真软件对抗仿真分析,重点分析对方抢修飞机成功率、防空导弹装备战损报废比例、防空导弹装备拦截能力及维修成功率等指标,模拟了系统行为。建立了一种基于系统动力学的防空装备战时维修保障系统仿真模型,并用该模型对系统中几个关键量进行了定量分析。仿真分析表明该模型具有一定的实用性,能为提高系统保障效能设计提供依据。

**关键词:** 系统动力学;战时维修保障;系统模型

**DOI:** 10.3969/j.issn.1009-3516.2009.04.010

**中图分类号:** TP15      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-3516(2009)04-0043-05

随着空防作战武器的不断发展,空防作战激烈程度前所未有,装备战时维修保障问题成为当前研究的热点问题。对于该类问题,由于实战演习代价大、时间长,而利用纯解析法来描述复杂的空战过程,模型复杂难解,故多采用仿真模拟的方式研究<sup>[1-3]</sup>。黄小军等<sup>[4]</sup>研究了通信装备战时保障系统的仿真建模,然而作者仅仅考虑了通信装备单方面的战损以及维修情况,没有从体系对抗角度研究。针对防空导弹装备战时维修保障的仿真,本文综合考虑了对方抢修飞机成功率、防空导弹装备战损报废比例、防空导弹装备拦截能力及维修成功率等因素,利用系统动力学(System dynamics,SD)方法<sup>[2]</sup>进行了空防对抗仿真分析,得到了有益的结论。

## 1 战时装备维修保障系统原理

装备战时维修保障系统,指的是为满足装备作战需要,在战场上运用应急诊断与修复技术,迅速的对故障装备进行评估并根据需要快速修复损伤部位,使装备能够恢复战斗力,并完成某项预定任务或实施自救的保障系统<sup>[5]</sup>。它包括以下几个部分:装备损伤评估系统、装备故障维修系统、装备维修过程信息收集系统、装备维修保障系统等。对它的建模必须考虑的因素有:我方的维修能力、战场环境、装备本身的故障概率和可维修性、装备备件供应情况、对方的打击能力、我方的抗打击能力甚至是运输能力。

战时装备维修保障流程为:我方的防空导弹装备在战场上由于受对方的攻击而存在战损,战损的装备进入一级维修(阵地抢修),维修成功的装备马上投入战场使用,而一级维修机构无法维修的装备转入二级维修(后方维修)。因此,二级维修存在一定的时间滞后。同理,二级维修成功的装备将直接投入战场补给装备,而二级维修也不能完成的装备报废或送到大后方的大修厂,然后以采购新装备形式补给装备<sup>[6]</sup>。

## 2 战时装备维修保障的系统动力学模型

研究动态反馈系统最有效的方法是系统动力学方法,这是一种面向问题的研究复杂系统的方法<sup>[7-11]</sup>。

\* 收稿日期:2008-05-01

作者简介:徐磊(1980-),男,北京人,博士生,主要从事空军装备发展研究。E-mail:VV-2000@sina.com

该方法建立的模型是一种因果机理型模型,需要通过细致分析和确定各因素间相互影响关系,并根据各因素的特性确定其变量类型,然后通过建立反馈流图,对系统赋初值从而进行仿真。

### 2.1 因果关系图

根据对装备战时保障系统运作和技术保障体制的介绍,结合具体的战场想定,不难看出装备战时保障系统的工作过程实质上是一个交战(装备战损)—装备维修—装备补充—交战(装备战损)的反馈回路,它反映了双方交战情况下,装备保障系统的动态运作过程,其装备维修保障系统因果关系见图1。

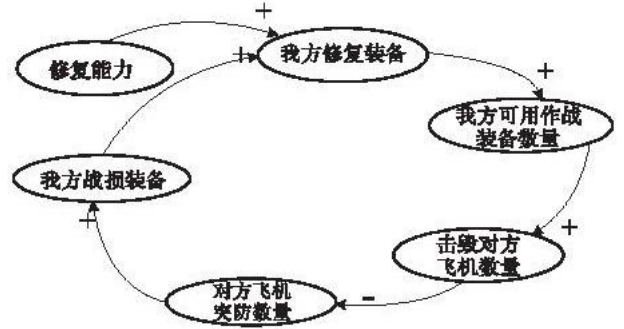


图1 因果关系图

Fig.1 Factor causality

### 2.2 系统流图

将上述的因果关系进行变量分类,构建系统流图见图2。模型中共有27个变量,其中流位变量有5个,流率变量有8个,其它变量有14个。各变量的符号表示与定义为: PMSL 为修复飞机速率; PN 为可作战飞机数量; PDL 为飞机战损率; PMSP 为对方抢修飞机成功率; PDN 为战损飞机数量; OPN 为每次作战任务出动飞机架次; IPA 为地空导弹装备拦截飞机能力; PCP 为每次作战任务出动飞机比例; MEN 为可作战的地空导弹装备数量; MMSL 为地空导弹装备修复速率; MDL 为地空导弹装备战损率; SM1 为一级维修修复地空导弹装备数量; SM2 为二级维修修复地空导弹装备数量; FMEN 为地空导弹装备一级维修数量; RSM1 为地空导弹装备一级维修成功系数; PCE 为突防飞机对地空导弹的作战效能; ODPN 为突防飞机架次; MDE 为一级维修后送到二级维修机构地空导弹装备数量; RDE 为送往二级维修机构地空导弹装备速率; SMSL 为报废和二级修复地空导弹装备速率; RSM2 为地空导弹装备二级维修成功系数; SAT 为时间调整系数;

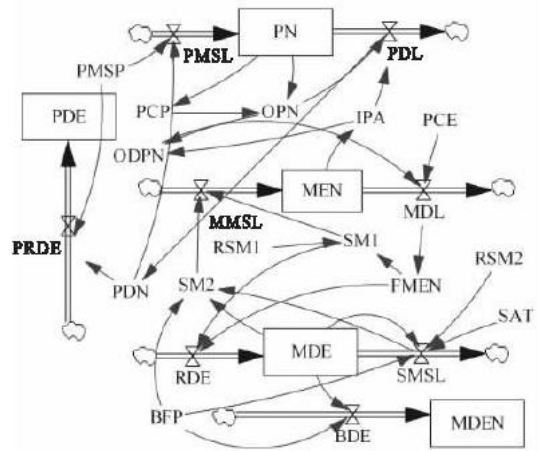


图2 系统流图

Fig.2 System flow chart

BFP 为地空导弹装备战损报废比例; BDE 为地空导弹装备报废速率; MDEN 为地空导弹装备报废或送大后方基地数量; PDE 为报废飞机数量; PRDE 为报废飞机速率。

### 2.3 DYNAMO 方程

方程中: L 表示流位变量; N 是对状态变量的赋初值; R 代表流率变量; A 代表辅助变量; C 代表常量; I、J、K 分别代表时间的过去、现在和将来。模拟的时间设为30天,方程如下:

$$\begin{aligned}
 L: PN .J &= PN .I + DT * (PMSL .JK - PDL .IJ) & R: MMSL .JK &= SM1 .J + SM2 .J \\
 N: PN &= 10\ 000 & A: SM1 .J &= FMEN .J * RSM1 \\
 R: PMSL .JK &= PDN .J * PMSP & C: RSM1 &= 0.3 \\
 A: PDN .J &= PDL .IJ & R: MDL .JK &= ODPN .J * PCE \\
 C: PMSP &= 0.7 & A: ODPN .J &= OPN .J * (1 - IPA) \\
 R: PDL .JK &= IPA .J * OPN .J & C: PCE &= 0.3 \\
 A: OPN .J &= PN .J * PCP & L: MDE .J &= MDE .I + DT * (RDE .IJ - SMSL .IJ) \\
 C: PCP &= 1/3 & N: MDE &= 0 \\
 C: IPA &= 0.3 & R: RDE .JK &= FMEN .J - SM1 .J \\
 L: MEN .J &= MEN .I + DT * (MMSL .IJ - MDL .IJ) & A: FMEN .J &= MDL .JK \\
 N: MEN &= 8\ 000 & R: SMSL .JK &= MDE .J * RSM2 / SAT + MDE .J
 \end{aligned}$$

\* BFP

C: RSM2=0.7

C: SAT=2

C: BFP=0.05

A: SM2.J=SMSL-MDE.J\*BFP

L: MDEN.J=MDEN.I+DT\*BDE.IJ

R: BDE.JK=MDE\*BFP

L: PDE.J=PDE.I+DT\*PRDE.IJ

R: PRDE.JK=PDN.J\*(1-PMSP)

其中,PMSP,RSM1,RSM2,BFP,IPA 为常量,将在下一节中讨论它们取不同值时对仿真结果的影响。

### 3 装备维修保障的系统动力学模型仿真分析

#### 3.1 PMSP 和 RSM1 的影响

分别研究 PMSP 为 0.7 和 0.9,以及 RSM1 分别为 0.5 和 0.3 情况,这样形成了 4 个方案:

Case1: PMSP=0.7, RSM1=0.5, RSM2=0.7;

Case2: PMSP=0.7, RSM1=0.3, RSM2=0.7;

Case3: PMSP=0.9, RSM1=0.5, RSM2=0.7;

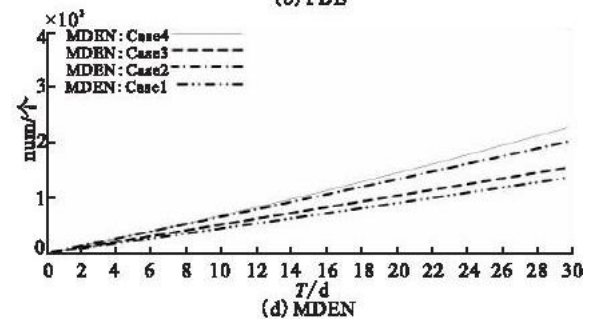
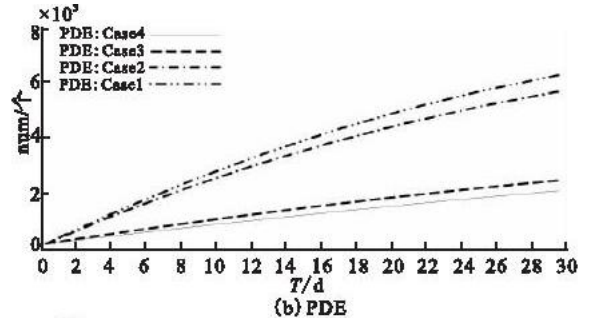
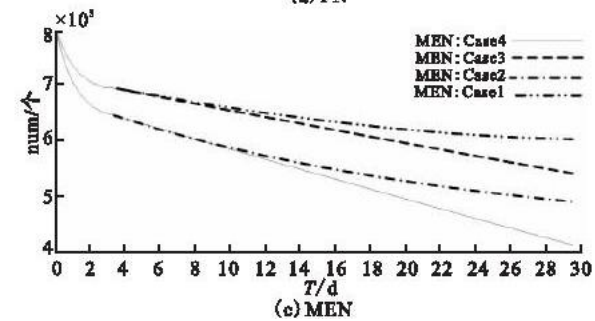
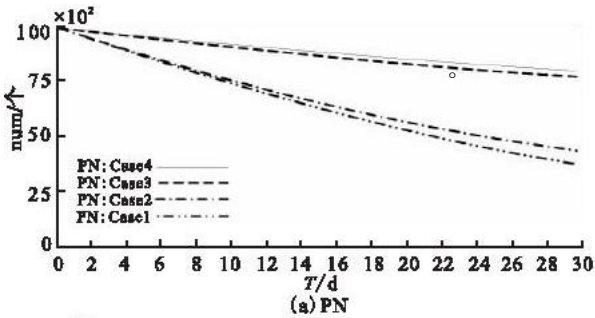


图3 方案1—4 装备数量变化情况

Fig. 3 Change of equipment quantity in scheme 1—4

结果分析:

1)通过 Case1 与 Case3 和 Case2 与 Case4 的比较,在防空导弹装备同样的 RSM1 条件下,PMSP 越高,对方飞机 PN 越大,PDE 越小;MEN 越小,而且战损速度更快,防空导弹装备的 MDEN 越大,即对方飞机抢修成功率越高,防空导弹装备战场抢修任务越重。

2)通过 Case1 与 Case2 和 Case3 与 Case4 的比较,在 PMSP 相同的条件下,RSM1 越高,对方 PN 下降速度较快,见图 3(a);对方 PDE 较多,见图 3(b);防空导弹装备 MEN 下降较慢,见图 3(c);报废数量上升速度最慢,见图 3(d)。可见,增大 RSM1 可弥补防空导弹作战效能不足的某种缺陷。

#### 3.2 BFP 的影响

BFP 为 0.05 和 0.1 时,BFP 越大,说明战斗越激烈,战斗中使用大量精确武器,使我防空导弹装备受损严重,这样 RSM1 分别为 0.5 和 0.3 时形成了 4 个方案:

Case5: BFP=0.05, RSM1=0.5, RSM2=0.7;

Case6: BFP=0.05, RSM1=0.3, RSM2=0.7;

Case7: BFP=0.1, RSM1=0.5, RSM2=0.7;

Case8: BFP=0.1, RSM1=0.3, RSM2=0.7;

对上面 4 种方案仿真模拟结果见图 4。

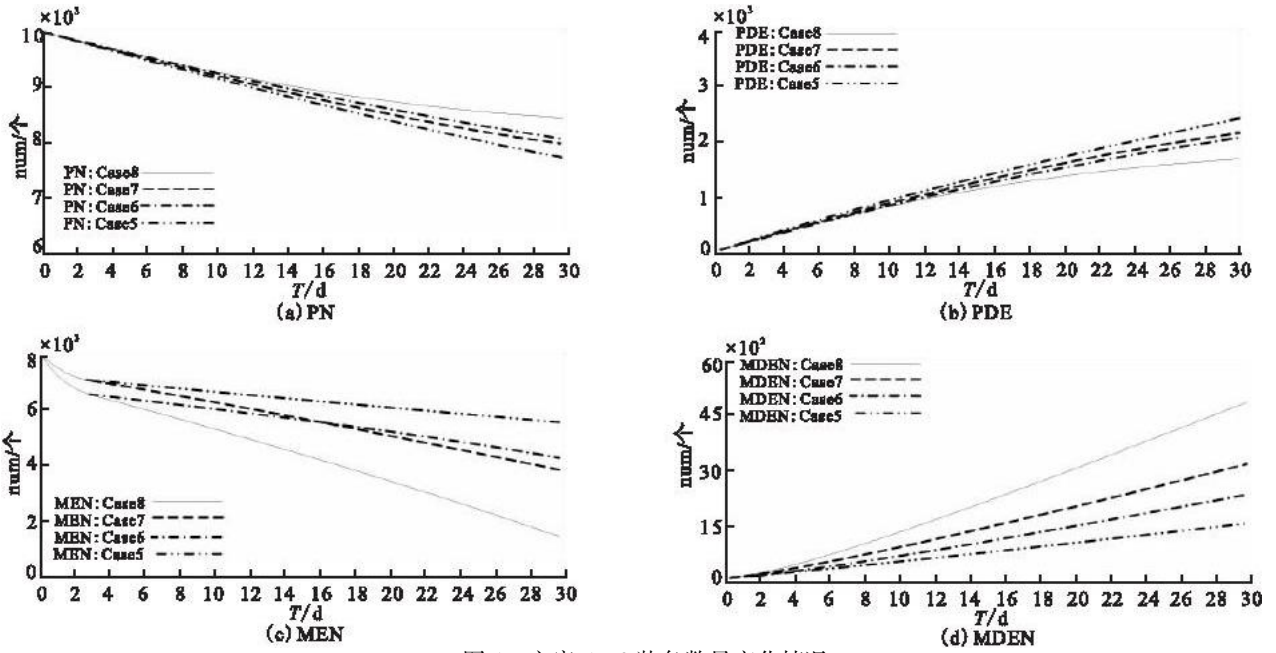


图4 方案5-8装备数量变化情况  
Fig. 4 Change of equipment quantity in scheme 5-8

结果分析:

1)通过图4(a)、图4(b)中的 Case5 与 Case6 和 Case7 与 Case8 的曲线比较,RSM1 在战斗初期对对方飞机影响不大,在第 10 次战斗之后影响比较明显。

2)通过图4(c)、图4(d)中的 Case5 与 Case7 和 Case6 与 Case8 的曲线比较,RSM1 越大,曲线下下降速度越慢,防空导弹装备生成能力更强;比较图4(c)中的 Case7 和 Case6,曲线出现交叉,这说明战斗初期,防空导弹装备报废比例增大可以通过 RSM1 来弥补,但随着作战持续,报废比例大,损失防空导弹装备多,通过增大一级维修成功系数也很难弥补。

### 3.3 防空导弹装备拦截能力 IPA 的影响

IPA 为 0.3 和 0.4 时,IPA 值大,防空导弹装备作战效能高,讨论 RSM1 分别为 0.5 和 0.3 形成的 4 个方案:

- Case9: PMSP=0.3, RSM1=0.5, RSM2=0.7;
- Case10: PMSP=0.3, RSM1=0.3, RSM2=0.7;
- Case11: PMSP=0.4, RSM1=0.5, RSM2=0.7;
- Case12: PMSP=0.4, RSM1=0.3, RSM2=0.7;

经过对上面 4 种方案仿真模拟,同理可以得到防空导弹装备拦截能力和一级维修成功系数作用明显,拦截能力越大,对方飞机损失越多,防空导弹装备战斗力越强,作战效能越高。一级维修成功系数同理。

## 4 结束语

在以上的系统中,通过努力提高一些量如维修成功率、拦截能力,可以大大增强装备作战能力,因此模型具有一定的实用性。同时,可以看出通过提高一级或二级维修的成功率,可以更大限度的发挥防空导弹装备的战斗力,也可以通过分析系统的其他参量来模拟系统的行为,通过对系统行为的分析,为设法提高系统保障效能提供依据。

### 参考文献:

[1] 王其藩. 系统动力学[M].北京:清华大学出版社,1994.  
WANG Qifan. System Dynamics[M].Beijing:Tsinghua University Press,1994.(in Chinese)

[2] 范浩. 通用装备维修保障资源需求仿真建模研究[J].军械工程学院学报,2005,17(4):47-51.  
FAN Hao. Modeling of Maintenance Resource Demand on Equipment Support with Simulation [J]. Journal of Ordnance

- Engineering College,2005,17(4):47—51.(in Chinese)
- [3] 张所新. 空军通信装备维修保障系统效能评估研究[D]. 西安:空军工程大学,2001.  
ZHANG Suoxin. Performance Evaluation of Air Force Communication Equipments Maintenance System [D]. Xian:Air Force Engineering University,2001.(in Chinese)
- [4] 黄小军,王宣刚. 基于系统动力学的通信装备战时保障系统建模初探[J]. 电光与控制,2006,13(5):42—44.  
HUANG Xiaojun, WANG Xuangang. Support System Modeling for Communication Equipment Based on System Dynamics [J]. Electronics Optics and Control, 2006,13(5):42—44.(in Chinese)
- [5] 张建宇,韩国柱,陈明. 武器系统备件储备量的遗传算法求解[J]. 军械工程学院学报,2005,17(6):35—38.  
ZHANG Jianyu, HAN Guozhu, CHEN Ming. Decide the Spare Parts' Reserves of Weapon Systems by Using the Method of Genetic Algorithms [J]. Journal of Ordnance Engineering College,2005,17(6):35—38.(in Chinese)
- [6] 何守军,浦金云. 舰艇战时保障的备件需求优化分析[J]. 航海工程,2003,32(5):35—38.  
HE Shoujun, PU Jinyun. The Optimization Analysis of the Spare Parts Requirement for the Ship's Supplement during the War[J]. Ship and Ocean Engineering,2003,32(5):35—38.(in Chinese)
- [7] 徐明德,黄振和,王俊良. 电子对抗装备规模优化的系统动力学仿真研究[J]. 装备指挥技术学院学报,2007,18(2):110—114.  
XU Mingde, HUANG Zhenhe, WANG Junliang. Research on Scales Optimization Analysis of Electronic Countermeasures Equipment Based on SD Simulation [J]. Journal of the Academy of Equipment Command and Technology, 2007,18(2):110—114.(in Chinese)
- [8] 耿振余,毕义明. 基于系统动力学的导弹体系作战效能仿真研究[J]. 现代防御技术,2005,33(6):1—4.  
GENG Zhenyu, BI Yiming. Research on Combat Effectiveness Simulation of Missile System Based on System Dynamic [J]. Modern Defense Technology,2005,33(6):1—4.(in Chinese)
- [9] Kreutzer W. System Simulation Programming Styles and Languages [M]. MA: Addison—Wesley Longman Publishing Co Inc,1986.
- [10] Karnopp D, Rosenberg R, Perelson Alan S. System Dynamics: A Unified Approach [J]. IEEE Trans on System Man and Cybernetics,1976,6(10):724—724.
- [11] Karnopp D C, Margolis D L, Rosenberg R C. System Dynamics: Modeling and Simulation of Mechatronic Systems [M]. New York: John Wiley and Sons Inc,2006.

(编辑:田新华)

## Research on Simulation of Aerial Defense Equipment Maintenance Support System in War Based on System Dynamics

XU Lei, WANG Wen—feng, YANG Jian—jun

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China)

**Abstract:** Through the analysis of the aerial defense equipment maintenance support system in war, the causality and flow figures of system are established, and the confrontation simulation is analyzed by using the software of system dynamics. Considering the targets such as the success percent of enemy airplane repair, the percentage of discarding the damaged aerial defense equipment, the intercept ability of the aerial defense equipment and the percentage of successful maintenance, the system action is simulated and the results shows that the model has some practicability, and can provide a basis for improving the system support efficiency.

**Key words:** system dynamics; maintenance support in war; system model