

## 【兵器与装备】

## 高能激光武器系统效能评估方法\*

王玉恒,杜太焦,刘峰,丁升

(西北核技术研究所,西安 710024)

**摘要:**介绍了武器系统效能的概念和一般分析过程,在分析高能激光武器系统效能评估要素的基础上,以WSEIAC提出的效能分析ADC模型为基本框架,建立了系统效能的综合评价模型.同时,从作战角度出发,对模型中的可用性矩阵、可信性矩阵和能力矩阵进行了概念性的研究.

**关键词:**系统效能评估;激光武器;作战效能

**中图分类号:**TP309

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-0707(2008)02-0001-03

在规划、研制武器系统时,效能、费用、周期和风险是评价武器系统的四大要素.其中,武器系统效能是关键,是研制、使用武器所追求的总目标,因此,效能评估是评价武器装备优劣的最主要手段,也是评定武器装备作战对抗能力的主要方法.

高能激光武器是发展中的新概念武器装备,对这类武器系统进行效能评估是规划、研制、发展和使用中的重要课题.在对高能激光武器系统进行效能评估时,根据评估对象和层次的不同,可以分为系统效能评估和作战效能评估.系统效能评估是站在武器装备的高度,对武器系统的总体效能进行评价;作战效能评估是站在激光武器作战系统的高度,对作战方面的动态环境和目标打击能力的评价.

进行效能评估是一项复杂的工作,涉及的方法很多.本研究以美国工业界武器系统效能咨询委员会(WSEIAC)提出的ADC效能评估模型<sup>[1-6]</sup>为基础,给出了激光武器系统效能评估的框架.在该方法框架中,按照使用目的的不同,通过对其中的部分内容进行侧重研究,也可以应用于对武器系统作战效能的评价.

## 1 效能评估的理论方法

**1.1 系统效能.**所谓系统效能,是指预期一个系统在规定条件下满足一组特定任务要求的度量.通俗的理解就是武器系统完成给定作战任务的能力.它是可用性(availability)、可信性(dependability)和能力(capability)的函数,如图1所示.可用性就是武器系统的战备状态,可信性就是武器系统的可靠程度,能力是武器系统的性能.

**1.2 效能分析的一般原理及过程.**武器系统效能评价的关键一环是适当选择“效能量度”(MOE).效能量度是效能大小的尺度,是系统达到任务目标程度的度量,它不像物理度量那样直接,一般是具有概率性质的数字特征或数学期

望值.关于武器效能度量的建立,一般是以模型为基础推导出来的.对武器系统效能评估是一种系统分析过程,一般典型的过程是:

- 1) 阐明评价武器系统效能的目的.
- 2) 对评估系统进行界定与描述,确定评估对象的范围及任务.
- 3) 确定系统中的品质因数.
- 4) 建立数学模型,计算各因素对效能的影响程度.
- 5) 评价比较,反复修改各影响因素,选择最佳方案.

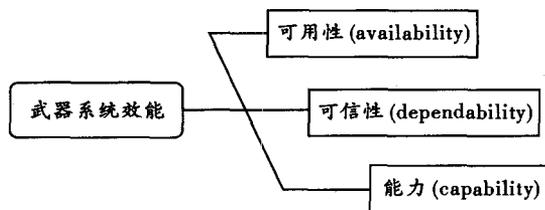


图1 武器系统效能结构

## 2 系统效能评估的ADC模型

从效能的定义可以看出,效能值是个相对数值,不是绝对数值,如何定量地描述这一能力,是效能评估中的重要课题.进行效能评估的关键是通过某种适当的评定方法建立起效能评估模型.评定武器系统效能的方法较多,有系统效能分析法、试验统计法、专家调查法(德尔菲法)、指数法、层次分析法等<sup>[2-3]</sup>.从目前常见的文献看,系统效能分析法使用最为广泛,大多武器系统效能分析都以其模型为基本框架.

系统效能分析法是由WSEIAC提出的系统效能评价方法.这种方法采用的是 $E = A \cdot D \cdot C$ 计算模型,因此,系统效能分析法也称为“ADC法”.ADC评价模型的基本表达式

\* 收稿日期:2008-01-28

作者简介:王玉恒(1977—),男,博士研究生,主要从事激光与材料相互作用的热-力学效应研究.

为:

$$E^T = A^T \cdot [D] \cdot [C] \quad (1)$$

其中  $E^T$  为品质因数行向量, 用来表征武器系统效能, 可表示为:

$$E^T = [e_1, e_2, \dots, e_k, e_{k+1}, \dots, e_n] \quad (2)$$

其中  $e_k$  为第  $k$  个品质因数数值(概率)。

$A^T$  是可用性行向量, 表征系统开始执行任务时处于不同状态的概率, 可表示为:

$$A^T = [a_1, a_2, \dots, a_k, a_{k+1}, \dots, a_n] \quad (3)$$

其中  $a_i$  为开始执行任务时处于  $i$  状态的概率. 可用性行向量是用以确定系统是否处于正常战斗状态。

$[D]$  是可信性矩阵, 表征系统由一种状态变化为另一种状态的概率, 可表示为:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中  $d_{ij}$  表示已知系统在开始执行任务时处于  $i$  状态, 而执行任务过程中处于  $j$  状态的概率。

$[C]$  是能力矩阵, 表征系统完成特定任务的概率, 可表示为:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & \dots & c_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中  $c_{jk}$  为系统在执行任务处于  $j$  状态时达到第  $k$  项效能指标的能力, 常用概率或有关的期望值表征. 能力矩阵是系统性能的集中体现. 矩阵中的每个元素是在执行任务期间武器系统状态下的能力指数. 可以这样认为, 在已知系统可用性和可信性的条件下, 能力指数就是所期望的武器系统的品质因数. 当系统满足马尔可夫假设时, 能力矩阵就是一列向量。

$E^T$  中  $e_k$  值为:

$$e_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i d_{ij} c_{jk} \quad (6)$$

### 3 高能激光武器系统效能评估要素

3.1 激光武器系统组成. 通常, 若不考虑防护系统和机动能力, 那么典型的激光武器系统由主战系统和保障系统组成, 如图 2 所示。

3.2 主战系统评估要素. 主战系统的评估要素实际上就是各子系统的各项能力的细化. 根据图 2, 评估中应该考虑的要素主要有:

- 1) 发射功率, 激光光子系统产生发射功率的能力。
- 2) 光束质量, 描述光束控制子系统所发射的激光在目标处的聚焦能力。
- 3) 捕获能力, 捕获跟踪子系统在各种天气条件下对目标的发现能力。
- 4) 瞄准精度, 在发现并锁定目标后, 靶上激光光斑平均质心位置与预定瞄准点的偏差。
- 5) 毁伤效应, 命中目标后使目标失效的可能性。
- 6) 有效射程, 射程范围与目标的关系。

7) 连续发射能力, 连续发射时武器系统的恢复时间。

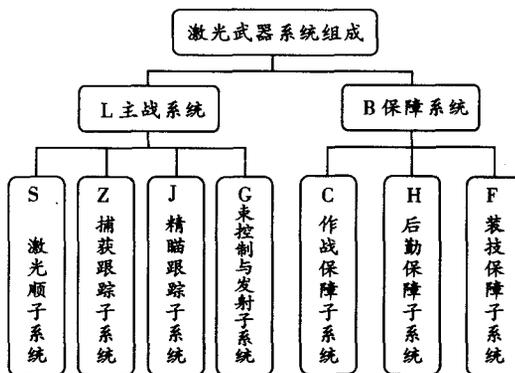


图 2 高能激光武器系统组成

3.3 保障系统评估要素. 保障系统是保障主战系统正常运转并使其充分发挥效能的关键. 显然, 对于一套成熟的激光武器系统, 保障系统对于武器的作战能力至关重要, 在系统效能评估中不可或缺. 然而, 对于尚在研制发展中的武器系统型号(譬如系统样机)来说, 保障系统往往并不完善, 要对其做出评价, 难以反映客观实际. 但是, 保障系统的效能评估可以为武器的发展提供论证参考。

- 1) 作战保障, 可以考虑作战预报、气象预报、测地、电子对抗、C3I、伪装等方面。
- 2) 后勤保障, 可以考虑军需、维修、燃料等。
- 3) 装技保障, 装技保障涉及人员能力问题, 较为复杂. 可以考虑故障检测能力、计量能力、技术资料的完备程度、人员维修能力等方面. 可以参考的描述技术保障的参数如平均延误停机时间, 平均供应响应时间, 平均维修时间等。

## 4 高能激光武器系统效能模型

4.1 激光武器系统效能的综合模型. 激光武器系统的总体效能由 3 项基本能力, 即攻击能力、保障能力和防护能力, 如果暂时不考虑系统的防护能力, 那么武器系统的攻击能力和保障能力正好与武器的主战系统和保障系统相对应. 这 2 个系统虽然是一个有机的整体, 但是在执行任务时基本是独立地完成各自的任务. 因此, 武器系统的总体效能  $E$ , 可用主战系统效能  $E_L$  和保障系统  $E_B$  的加权和来计算, 可表示为:

$$E = W_1 E_L + W_2 E_B \quad (7)$$

其中分系统效能利用  $E = A \cdot D \cdot C$  模型计算. 对于式(7), 根据目的和任务的不同, 如果侧重于考察武器系统对目标的攻击能力, 可将  $W_2$  权重取得很小或令其为 0, 那么可以得到激光武器系统的作战效能:

$$E = E_L^T = A^T \cdot [D] \cdot [C] \quad (8)$$

高能激光武器系统主要担负着对敌目标的作战任务, 所以其作战效能主要体现在其完成任务的能力. 由系统组成可知, 在不考虑对抗条件时, 其能力  $C$  主要与捕获目标能力、毁伤目标能力、大气传输能力、火力反应能力等有关. 这些能力可以分别由相应的概率来描述:

- 1) 捕获目标能力, 系统发现和识别目标的概率  $P_F$ .

2) 火力反应能力,系统的可发射概率,又称服务概率  $P_S$ .

3) 大气传输能力,经过大气传输后激光能量达到有效范围的概率  $P_D$ .

4) 毁伤目标能力,系统击中目标后将其毁伤的概率  $P_H$ .

因此,激光武器系统的作战能力  $C$  可表示为:

$$C = P_F \cdot P_S \cdot P_D \cdot P_H \quad (9)$$

4.2 可用性向量.以式(8)为基本模型,其中的  $A^T$  是可用性行向量,它由激光武器系统开始执行任务时处于各种工作状态的概率组成.激光武器系统的工作状态一般分为正常工作状态和发生故障状态.可以认为图2武器作战系统中的各个子系统是串联结构,如图3所示,某一子系统的故障会引起全系统作战故障.而一般激光武器子系统是由多模块并联组成,如图4所示,若某一模块发生故障,会降低发射功率,但这并不影响激光束的发射,因此,也可认为系统处于正常状态.

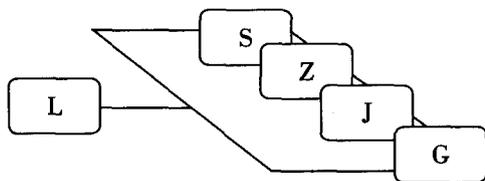


图3 各子系统串联结构

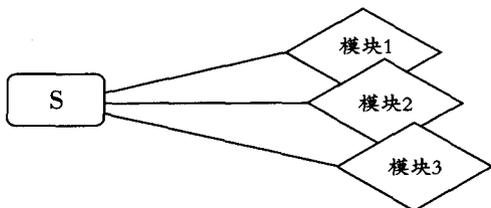


图4 激光器子系统并联结构

为方便起见,我们以3模块激光器系统为例来说明,各状态定义为:

状态1 各子系统正常,系统正常.

状态2 1个模块发生故障,其他各子系统正常,激光器能够火力发射,系统正常.

状态3 2个模块发生故障,其他各子系统正常,激光器能够火力发射,系统正常.

状态4 系统故障.

这4种可能状态构成了可用性向量的样本空间,因此有:

$$A^T = [a_1, a_2, a_3, a_4] \quad (10)$$

式中  $a_i$  表示系统在开始执行任务时分别处于状态1、状态2、状态3、状态4的概率.

显然 
$$\sum_{i=1}^4 a_i = 1 \quad (11)$$

考虑各子系统,那么式(10)中的  $a_i$  可分别表示为:

$$a_1 = a_S^3 a_Z a_J a_G \quad (12)$$

$$a_2 = a_S^2 (1 - a_S) a_Z a_J a_G \quad (13)$$

$$a_3 = a_S (1 - a_S)^2 a_Z a_J a_G \quad (14)$$

$$a_4 = 1 - a_1 - a_2 - a_3 \quad (15)$$

式中:  $a_S, a_Z, a_J, a_G$  分别是各子系统正常工作的概率,下标表示的各子系统见图2.

根据可靠性理论有

$$a_S = \frac{MTBF_S}{MTBF_S + MTTR_S} \quad (16)$$

$$a_Z = \frac{MTBF_Z}{MTBF_Z + MTTR_Z} \quad (17)$$

$$a_J = \frac{MTBF_J}{MTBF_J + MTTR_J} \quad (18)$$

$$a_G = \frac{MTBF_G}{MTBF_G + MTTR_G} \quad (19)$$

式中:  $MTBF_S, MTBF_Z, MTBF_J, MTBF_G$  分别是各子系统的平均无故障时间;  $MTTR_S, MTTR_Z, MTTR_J, MTTR_G$  分别是各子系统的平均修复时间.

4.3 可信性矩阵.计算出可用性向量后,可以建立激光武器系统效能的可信性矩阵  $[D]$ .已知系统在开始执行任务时有4种可能状态,则这里的  $[D]$  是4阶方阵,表示系统在执行任务时可以有  $4 \times 4$  种可能的转化状态,表达式为

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} \end{bmatrix} \quad (20)$$

前面已经介绍了  $d_{ij}$  的含义,各种状态转化的概率构成了可信性矩阵的样本空间.

对于各子系统组成的串联系统,其可靠性表达式服从指数分布,即:

$$R_S = \exp(-\lambda_S t), R_Z = \exp(-\lambda_Z t), \\ R_J = \exp(-\lambda_J t), R_G = \exp(-\lambda_G t) \quad (21)$$

式中:  $\lambda_S, \lambda_Z, \lambda_J, \lambda_G$  分别是各子系统的故障率;  $t$  是系统任务的工作时间.

为建立可信性矩阵,可以利用随机过程理论.根据定义的系统状态绘制状态转移空间图,由空间图结合式(21)可以得到转移概率矩阵  $[Q]$  和状态方程系数矩阵  $[P]$ ,解由此得到的系统状态微分方程组,就可以得到系统的可信性矩阵  $[D]$ .

4.4 能力矩阵.系统的能力与在执行任务时所处的状态密切相关.同一系统,由于所处的状态不同,其完成任务的能力(概率)也不同.对于激光武器系统,其工作能力一般只与转移的最终状态有关,而与初始状态无关,即具有马尔可夫性<sup>[7]</sup>.在此情况下,能力矩阵转化为能力列向量,即:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} \quad (22)$$

这里,  $C_i$  表示激光武器系统在执行任务时处于  $i$  状态时,其完成任务的能力.由式(9)可知激光武器系统作战能力  $C$  的表示形式,那么可得:

$$C_i = P_{Fi} \cdot P_{Hi} \cdot P_{Di} \cdot P_{Si}, i = 1, 2, 3, 4$$

所以

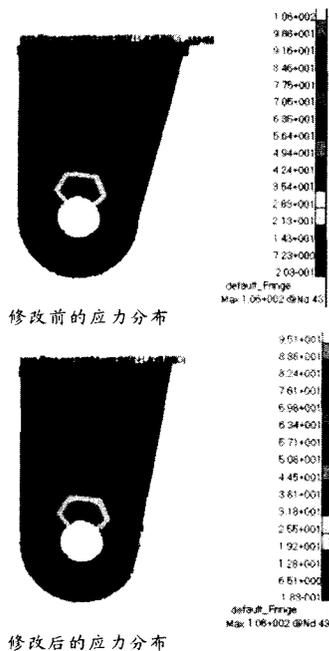


图5 工况3应力分布比较

由图3~5可以看出,修改后的耳片最大应力减少了1/10左右,并且应力分布明显比原耳片更均匀,减小了应力集中,延长了耳片的寿命,为提高整个前起落架的寿命提供了重要的一环。

## 5 耳片改进设计中需要注意的问题

在耳片的改进设计中,需要注意3个问题。

1) 优化、改进是一个不断迭代的过程,代理模型一定要

准确建立。Patran的二次开发需要与Isight实现无缝连接。

2) 修改减小了应力集中,具体对疲劳寿命的提高程度,可以通过下一步的疲劳试验来进行验证。

3) 细节的耐久性设计在很大程度上是针对整个结构的一个细节,在设计、改进的过程中,需要考虑改进对整个结构的影响。

## 6 结束语

从应力云图可以看出,模型优化结果符合要求,因此将CAD技术运用到多学科优化中切实可行。用VC++对MSC.Patran进行二次开发和建立代理模型是整个结构优化中重要的一环,同时经验公式也对结构细节的优化起到了重要作用。

## 参考文献:

- [1] 航空航天工业部科学技术研究院.近代飞机耐久性设计技术[M].成都:航空航天工业部《AFFD》系统工程出版社,1989.
- [2] 陈水根.主起落架外筒疲劳耐久性评估及损伤容限评估[D].西安:西北工业大学,2004.
- [3] 李自胜,朱莹,向中凡.基于CATIA软件的二次开发技术[J].四川工业学院学报,2003,22(1):16-18.
- [4] 万俊麟.基于虚拟试验技术的飞机起落架疲劳性能研究[D].南京:南京航空航天大学,2006.
- [5] Nie Hong, Wu Fumin. Prediction of fatigue crack initiation life based on a new local stress/strain analysis approach [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1988, 9(9): 424-429.

(上接第3页)

$$[C] = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{F1} \cdot P_{H1} \cdot P_{D1} \cdot P_{S1} \\ P_{F2} \cdot P_{H2} \cdot P_{D2} \cdot P_{S2} \\ P_{F3} \cdot P_{H3} \cdot P_{D3} \cdot P_{S3} \\ P_{F4} \cdot P_{H4} \cdot P_{D4} \cdot P_{S4} \end{bmatrix} \quad (23)$$

利用相关方法和模型就可以计算激光武器各项能力数值P,然后建立能力列向量,最后可以给出效能评估的各项品质因数。值得注意的是,如何计算武器系统的能力是效能评估问题中的一个难点,这项工作需要深入开展。

## 5 结束语

为了探讨高能激光武器系统效能评估方法,本研究从一般原理入手,首先介绍了武器系统效能的概念和一般分析过程。对于系统效能评估,ADC模型物理概念清晰,以该模型为基本框架讨论了将其应用于高能激光武器系统效能评估的可行性。问题的关键是根据评估目的,选定合适的评估要素。激光武器系统的总体效能评估涉及的子系统复杂,指标和元素数量众多,因此,要做好全面的效能评估是困难的。本

研究从武器系统发展考虑,忽略了部分评估要素,主要侧重于作战效能模型的建立。建立了基本模型,要解决的关键技术就是计算各种状态条件下武器的作战能力。

## 参考文献:

- [1] 康崇禄.国防系统分析方法[M].北京:国防工业出版社,2003.
- [2] 甄涛,王平均,张新民.地地导弹武器作战效能评估方法[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [3] 高尚,姜寿春.武器系统效能评定方法综述[J].系统工程理论与实践,1998(7):109-114.
- [4] 时俊红.武器系统效能评估方法浅论[J].火控雷达技术,2003(4):47-50.
- [5] 魏继才,胡晓峰.武器系统效能建模方法研究与应用[J].系统工程与电子技术,2002(6):20-24.
- [6] 刘天坤,赵玉善.防空武器系统效能分析研究[J].地面防空武器,2005(4):22-25.
- [7] 汪荣鑫.随机过程[M].西安:西安交通大学出版社,2006.