

单机掩蔽库群生存概率计算模型

许金余^{1,2}, 于萍¹, 赵靖^{1,2}

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 西北工业大学 土建系, 陕西 西安 710072)

摘要:通过引进概率可靠度分析方法,对第三代主战飞机平原机场单个单机掩蔽库在爆炸荷载作用下的生存概率进行了分析,在此基础上通过引进系统工程方法,对机库群的生存概率进行了研究,给出了机库群生存概率的计算模型。

关键词:单机掩蔽库;可靠度;生存概率;结构抗力;爆炸荷载;层次分析法

中图分类号:V351.18;O491 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2003)06-0008-03

单机掩蔽库工程是平原机场飞机防护工程,为妥善解决飞机平原机场防护工程的建设问题,针对当前的防护指导思想,在总体布局上,一改过去集中联跨建设的思路,按照分散防护的思想,合理采用了“大分散、小集中”的多个库区的总体平面布局。本文通过引进概率可靠度分析方法,对第三代主战飞机平原机场单个单机掩蔽库在爆炸荷载作用下的生存概率进行了分析,在此基础上通过引进系统工程方法,对“大分散、小集中”总体布局下的机库群生存概率进行了研究,并给出了机库群生存概率的计算模型。

1 单个飞机掩蔽库在爆炸荷载作用下生存概率计算

1.1 分析模型

从安全度分析的角度,单机掩蔽库在外部环境条件下,可能处于两种状态:安全与破坏。若用 x_1, x_2, \dots, x_n 等设计变量表示对状态的各种影响因素,则定义函数 $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 来反映结构所处的状态。根据工程使用要求,给出最低使用极限状态参数 Z_0 ,有: $Z \geq Z_0$ 掩蔽库结构处于安全状态; $Z < Z_0$ 掩蔽库结构处于破坏状态。由于各设计变量多为随机变量,状态函数也为随机变量,则飞机掩蔽库的安全度可定义为结构处于安全状态的概率(生存概率),即 $P_s = P(Z \geq Z_0)$ 。相应的毁伤概率为 $P_f = 1 - P_s$ 。若已知 Z 的概率分布密度函数 $f(Z)$,则生存概率为 $P_s = \int_{Z_0}^{\infty} f_Z(Z) dz = 1 - F_Z(Z_0)$ 。将设计变量 x_1, x_2, \dots, x_n 互相独立,且概率密度函数分别为 $f_{x_1}, f_{x_2}, \dots, f_{x_n}$,有 $F_Z(Z_0) = \int_{g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq Z_0} f_{x_1} f_{x_2}, \dots, f_{x_n} dx_1, dx_2, \dots, dx_n$

1.2 单机掩蔽库生存概率简化计算

1.1 中 $F_Z(Z_0)$ 的积分一般难以解析计算,须采用简化假设和近似计算。下面以结构在外部荷载、结构抗力两项随机因素影响下结构安全度为例分析。

将单机掩蔽库简化为一拱形结构,该掩蔽库承受外部荷载 S ,结构抗力 R ,各自概率密度函数为 $f_S(s)$ 和 $f_R(r)$ 。若定义状态函数 $Z = R/S$,且取 $Z_0 = 1.0$,则 $F_Z(Z_0) = \int_{\frac{R}{S} < 1} f_S(s) \cdot f_R(r) ds dr$ 。单机掩蔽库的生存概

率为 $P_s = P(R > S) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^r f_S(s) \cdot f_R(r) ds dr$ 。在抗爆结构安全度分析中,通常假设随机变量 S, R 均服从

收稿日期:2003-06-05

基金项目:总后科研项目资助(HX00502)

作者简介:许金余(1963-),男,吉林靖宇人,教授,博士生导师,主要从事防护工程、结构工程及岩土工程研究。

正态分布,且两者相互独立。则上式 P_s 即为 $P_s = P(R > S) = \phi\left(\frac{\ln(\mu_R/\mu_s)}{\sqrt{\ln(1+\delta_R^2)(1+\delta_S^2)}}\right)$ 。式中: μ_R, μ_s 分别为 R, S 的数学期望; $\delta_R = \sigma_R/\mu_R, \delta_S = \sigma_S/\mu_S$ 分别为 R 的变异系数和均方差; $\delta_S = \sigma_S/\mu_S, \delta_S, \sigma_S$ 分别为 S 的变异系数和均方差; $\phi(\xi)$: 标准正态分布随机变量 ξ 的分布函数。令 $\theta = \mu_R/\mu_s, \Omega = \sqrt{\ln(1+\delta_R^2)(1+\delta_S^2)}, \beta = \ln(\theta)/\Omega$ 。显然 $\theta = \text{EXP}(\beta \cdot \Omega)$ 。定义 θ 为结构安全设计系数, β 为结构安全系数。结构安全度为 $P_s = \phi(\beta)$ 。

综合考虑敌人的发现概率,单机掩蔽库的生存概率可采用 $P_s = 1 - P_f(1 - \phi(\beta)) = 1 - P_f(1 - \phi\left(\frac{\ln(\mu_R/\mu_s)}{\sqrt{\ln(1+\delta_R^2)(1+\delta_S^2)}}\right))$ 计算。欲计算飞机掩蔽库的生存概率,就必须计算 S, R 的数字特征值。

1.3 飞机掩蔽库的外部荷载确定

引起飞机掩蔽库破坏的因素主要是爆炸冲击波和侵彻效应,对于常规精确制导武器,主要考虑地面爆炸的冲击波超压和侵彻效应,侵彻效应可采用 $h_q = \lambda \lambda_1 \lambda_2 k_q P V k_c \cos \alpha / d^2$ 计算常规武器对混凝土结构的侵彻深度^[3],在此仅讨论常规武器地面爆炸的冲击波超压;而对于核爆炸,主要考虑近地面爆炸的冲击波超压。

1.3.1 常规武器地面爆炸冲击波超压近似计算

当 $0.473 \leq R/\sqrt[3]{C} \leq 9.58$ 时, $\Delta P_m = 1.316(\sqrt[3]{C}/r)^3 + 0.369(\sqrt[3]{C}/r)^{3/2}$ 。式中: ΔP_m 为入射冲击波超压峰值(MPa); r 为爆心至所求点距离(m); C 为等效梯恩梯装药量(kg), C 等于装药量 C_0 与当量系数 β_s 乘积。

在实际情况下,发射装置对目标的瞄准有一定的误差,弹着点坐标为一随机变量,选取掩蔽库(群)中心为瞄准中心。若考虑目标与瞄准中心的距离为 H ,且假设弹着点服从正态分布,则弹着点距目标的距离 R 也是随机变量,且服从莱斯分布。根据莱斯分布,由概率分布数字特征定义,可求出 R 的数学期望为 μ_r 和均方差 σ_r 。则冲击波超压值的数学期望和均方差分别为 $\Delta \bar{P}_m = 1.316(\sqrt[3]{C}/\mu_r)^3 + 0.369(\sqrt[3]{C}/\mu_r)^{3/2}; \sigma_{\Delta P_m}^2 = \sigma_r^2 \left\{ \frac{\partial \Delta P_m}{\partial r} \Big|_{r=\mu_r} [1.316 \sqrt[3]{C}/\mu_r)^3 + 0.369 \sqrt[3]{C}/\mu_r)^{3/2}] \right\}^2$ 。

1.3.2 小型核武器近地爆地面冲击波超压近似计算

当 $7.1 \leq r/W^{1/3} \leq 18.8$ 时, $\Delta P_i = 1.164 \times 10^6 (W^{1/3}/r)^{3.45}$; 当 $\leq r/W^{1/3} \leq 18.8$ 3500 时, $\Delta P_i = 3.0 \times 10^5 (W^{1/3}/r)^3 + 1.96 \times 10^2 (W^{1/3}/r)^{3/2}$ 。式中: r 为研究点到爆心的距离(m); W 为核武器的梯恩梯当量(kt)。

同理,可求得 $\Delta \bar{P}_i, \sigma_{\Delta P_i}^2$ 。

1.4 飞机掩蔽库的结构抗力分析

第三代主战飞机单机掩蔽库通常按弹塑性体系设计。将飞机掩蔽库简化为铰支承的拱形结构,根据飞机掩蔽库的实际破坏情形分两种情况对拱形结构进行分析,可得飞机掩蔽库的结构抗力如下:

1) 压缩模型。整个拱均匀压缩,拱的单位曲面抗力为 $r_{yc} = (0.85f_c + 0.9\rho f_y) A_c / R$ 。式中: R 为到厚度中心的拱半径; f_c 为混凝土的极限抗压强度; f_y 为钢筋或波纹钢抗拉屈服强度。

2) 弯曲模型。仅考虑固定支承情况,拱的抗力为 $f_{yf} = 8M_u [1 - (\theta^2/\pi)] / (\theta R)^2$ 。式中: θ 为拱的半中心角; M_u 为内衬波纹钢板钢筋混凝土拱肋的极限抗弯能力。

由1)、2)中两式通过数值计算即可求得抗力的数字特征值: $\bar{r}_{yc}, \sigma_{r_{yc}}^2, \bar{r}_{yf}, \sigma_{r_{yf}}^2$ 。

2 单个机库区生存概率计算

2.1 层次分析法

层次分析法(AHP法)由美国著名运筹学家 T. L. Saaty 20 世纪于 70 年代中期提出,80 年代初引入我国,也称重量模型,层次分析法解决问题的基本过程如下:

1) 构造层次分析结构模型。首先把决策的复杂系统分解为各种组成因素,将这些因素再按支配关系分解为次级组成因素,如此层层分解,形成一个有序的金字塔式的树状层次结构,这就建立了不同层次因素之间的相互关系。其中最上层为目标层,最下层为可供选择的决策方案层,中间各层为评价准则层。

2) 构造判断矩阵。一个因素被分解为若干个与之有关的下层因素,各下层因素对该因素的作用大小不同,一般称为权重 ω 。通过各因素的权重两两比较,按照一定的顺序进行排列,就构成一个判断矩阵。

3) 逐层单排序,即根据判断矩阵计算各因素的权重,并进行一致性检验。

4) 总排序, 取得决策结果。

2.2 单个机库区生存概率计算

在已计算出各单机掩蔽库生存概率情况下, 通过引进层次分析法, 单个机库区的生存概率可用 $P_{SS} = \sum_{i=1}^N P_{Si} \omega_i$ 计算。式中: P_{SS} 为单个机库区生存概率; P_{Si} 为第 i 个飞机掩蔽库的生存概率, $i = 1, 2, 3, \dots, N$, N 为整个机库区中所包含掩蔽库的个数。 ω_i 为单个库区中第 i 个飞机掩蔽库的重要性权值系数, ω_i 可通过层次分析法求得。

3 机库群生存概率计算

在已经计算出各库区生存概率的情况下, 通过引进层次分析法, 整个机库群的生存概率可用 $P_{SSS} = \sum_{i=1}^N P_{SSi} \omega_i$ 计算。式中: P_{SSS} 为机库群生存概率; P_{SSi} 为第 i 个库区的生存概率, $i = 1, 2, \dots, N$, N 为整个机库群中所包含的库区个数, 通常 $N = 3$, 其中 P_{SS1} 、 P_{SS2} 、 P_{SS3} 分别表示东、中、西库区的生存概率。 ω_i 为第 i 个库区的重要性权值系数, 可通过层次分析法求得。

4 结束语

单机掩蔽库工程是解决平原机场飞机防护问题的重要而有效的措施。其战争条件下生存能力的大小, 直接影响着飞机作战任务的完成。本文提出的单机掩蔽库群生存概率计算方法在几个工程建设中得到了应用, 这为战场建设决策分析提供了可行和有效的方法。

参考文献:

- [1] 许金余, 赵 靖, 曹定国. 防空阵地防护等级模糊综合评判[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2001, 2(5): 86 - 89.
- [2] 陈志龙, 俞儒一. 结构常规武器局部破坏极限概率设计可靠度分析[A]. 中国土木工程学会防护工程学会第五次年会论文集[C]. 1996. 117 - 120.
- [3] 俞儒一, 钱七虎. 防护结构概率极限状态设计方法研究[A]. 中国土木工程学会防护工程学会第五次学术年会论文集[C]. 1996. 125 - 132.
- [4] 许金余, 刘开帝, 战 勇. AHP 法在阵地系统生存概率计算中的应用[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2001, 2(1): 84 - 87.

(编辑: 姚树峰)

A Calculating Method of Survival Probability of Single - airplane Shelter Group

XU Jin - yu^{1,2}, YU Ping¹, ZHAO Jing^{1,2}

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China; 2. Dept. of Civil Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: According to the analytical method of reliability, the paper analyzes the survival probability of a single - airplane shelter under explosive load in the plain airfield for the third generation main fighting airplane. Based on this, the survival probability of single - airplane shelter group is studied, and its calculating model is given by introducing system engineering method.

Key words: single - airplane shelter; reliability; survival probability; structure resistance; explosive load; Analysis of Hierarchy Process (AHP)