

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.08.006

装备战场失效模型及其应用

郭铁轩, 周雷

(总装重庆军代局驻绵阳地区军代室, 四川 绵阳 621000)

摘要: 根据机械系统和电子系统的不同特点, 针对战争中多种类型的攻击, 建立装备战场失效率的一般模型。对战场视效率模型进行介绍, 导出寿命分布函数以及平均寿命、方差和相关系数。通过实例进行比较、分析, 提出了减小相关系数, 提高装备战场可靠性的理论途径。

关键词: 战场; 失效率; 可靠性

中图分类号: N945.12; TP202+.1 **文献标识码:** A

Failure Model of Equipment on Battlefield and Its Applications

Guo Tiexuan, Zhou Lei

(Mianyang Office of Chongqing Military Representative Bureau of PLA General Equipment Department, Mianyang 621000, China)

Abstract: According to differences between mechanism system and electronic system and various attacking types in the war, establish a failure rate model. Introduce the visual rate model, the life span distribution function, average life, variance and relative coefficient. Based on example comparison and analysis, introduce the method to reduce relative index to equipment field reliability.

Keywords: battlefield; failure rate; reliability

0 引言

火炮、坦克、雷达、舰艇、飞机等武器装备(简称装备)通常由机械和电子两大系统组成, 装备的可靠性由机械和电子系统决定。在战争中, 装备面临多种形式的外界攻击, 按照物理机制可粗略分为: 1) 以摧毁装备实体为目的的传统型攻击, 例如远程火炮、集束炸弹、精确制导导弹、核武器等, 称为攻击源 I; 2) 以摧毁电子系统为目的的新型攻击, 例如电磁脉冲类武器可直接破坏电子系统硬件, 电磁波干扰和网络攻击可破坏通信, 使得装备失效, 称为攻击源 II。除此之外, 还应考虑装备自身因素引起的失效。故针对装备在战争中受到外界攻击失效问题, 建立装备战场失效的一般模型。

1 战场失效率模型

从问题背景中可以抽象建立装备战场失效率的一般模型为:

装备由部件 I (机械系统) 和部件 II (电子系统, 包括软件系统) 组成, 其寿命为非负随机变量 X_1 、 X_2 , 在未受到外界冲击时分别遵从参数为 λ_1 和 λ_2 的指数分布。当部件 I 和部件 II 中任一部件失效即引起装备失效。故在战场上, 当装备未受到外界攻击时可也以不考虑可修因素, 其寿命为:

$$X = \min \{ X_1, X_2 \} \tag{1}$$

故装备的可靠度为:

$$\begin{aligned} R(t) &= P\{ \min \{ X_1, X_2 \} > t \} = P\{ X_1 > t, X_2 > t \} \\ &= \prod_{i=1}^2 P\{ X_i > t \} = \prod_{i=1}^2 R_i(t) = \prod_{i=1}^2 \exp\{ -\lambda_i t \} \\ &= \exp\{ -(\lambda_1 + \lambda_2) t \} \end{aligned} \tag{2}$$

即装备寿命 X 遵从参数为 $\lambda_1 + \lambda_2$ 的指数分布, 装备失效率为:

$$\lambda(t) = \frac{-R'(t)}{R(t)} = \lambda_1 + \lambda_2 \tag{3}$$

装备平均寿命为:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \tag{4}$$

装备在受到外界攻击后可能会失效。假定 2 个相互独立的 Poisson 过程 P_1 和 P_2 控制着攻击源 I 和攻击源 II 的发生, 其强度分别为 τ_1 和 τ_2 。

P_1 中出现攻击时, 对部件 I 和部件 II 都有影响, 分别以概率 p_{01} 和 p_{10} 引起部件 I 和部件 II 失效, 以概率 p_{00} 引起 2 个部件同时失效, 以概率 p_{11} 使 2 个部件都不失效。显然, $p_{00} + p_{01} + p_{10} + p_{11} = 1$ 。

P_2 中出现攻击时, 仅以概率 p_2 引起部件 II 失效, 对部件 I 无影响。

2 装备战场寿命分布

假设装备在使用良好时受到外界攻击, 其寿命

收稿日期: 2010-04-05; 修回日期: 2010-06-25
作者简介: 郭铁轩 (1965-), 男, 河南人, 从事雷达工程研究。

为 Y , 易知装备在战场上的真实寿命由 $\min\{X, Y\}$ 决定。若在未受到外界攻击时, 装备已失效, 此时, 装备的寿命分布完全等同于 X 的分布, 不再赘述。

下面仅讨论寿命 Y 的分布, 即装备在使用良好时受到外界攻击的寿命分布。

记 Y_1 和 Y_2 分别为部件 I 和部件 II 的寿命, 令:

$$\bar{F}(y_1, y_2) = P\{Y_1 > y_1, Y_2 > y_2\}, \quad y_1, y_2 \geq 0 \quad (5)$$

下面利用 Poisson 过程的性质导出 $\bar{F}(y_1, y_2)$ 的表达式。

记 $N_1(s, t)$ 和 $N_2(s, t)$ 分别为 Poisson 过程 P_1 和 P_2 在时间 $(s, t]$ 中出现的攻击次数, 先讨论 $0 \leq y_1 \leq y_2$ 的情形, 此时有:

$$\begin{aligned} \bar{F}(y_1, y_2) &= P\{N_1(0, y_1) = i, \text{ } i \text{ 次攻击不使部件 I、部件 II 失效}, i = 0, 1, \dots; \\ N_1(y_1, y_2) = j, \text{ } j \text{ 次攻击不使部件 II 失效}, j = 0, 1, \dots; \\ N_2(0, y_2) = k, \text{ } k \text{ 次攻击不使部件 II 失效}, k = 0, 1, \dots\} \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(\tau_1 y_1)^i}{i!} e^{-\tau_1 y_1} p_{11}^i \sum_{j=0}^{\infty} \frac{[\tau_1 (y_2 - y_1)]^j}{j!} e^{-\tau_1 (y_2 - y_1)} (p_{01} + p_{11})^j \cdot \\ &\quad \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\tau_2 y_2)^k}{k!} e^{-\tau_2 y_2} (1 - p_2)^k \\ &= \exp\{-\tau_1(1 - p_{11})y_1 - \tau_1(p_{00} + p_{10})(y_2 - y_1) - \tau_2 p_2 y_2\} \\ &= \exp\{-\tau_1 p_{01} y_1 - [\tau_1(p_{00} + p_{10}) + \tau_2 p_2] y_2\} \quad (6) \end{aligned}$$

对 $0 \leq y_2 \leq y_1$ 的情形, 同理可得:

$$\bar{F}(y_1, y_2) = \exp\{-(\tau_1 p_{10} + \tau_2 p_2)y_2 - \tau_1(p_{00} + p_{01})y_1\} \quad (7)$$

综合以上 2 种结果, 可以统一为:

$$\bar{F}(y_1, y_2) = \exp\{-\tau_1(p_{01}y_1 + p_{10}y_2) - \tau_2 p_2 y_2 - \tau_1 p_{00} \max(y_1, y_2)\} \quad (8)$$

当 $p_{00} = p_2 = 1$ 时, 即每一次攻击, 无论是攻击源 I 或攻击源 II 发起的攻击, 都会使得装备完全失

效或部件 II 完全失效。此时, 装备战场失效率模型退化为致命攻击模型, 即:

$$\bar{F}(y_1, y_2) = \exp\{-\tau_2 y_2 - \tau_1 \max(y_1, y_2)\} \quad (9)$$

式 (9) 物理意义明确, 并验证了一般模型的正确性。

进一步, 可以从式 (8) 中推导出装备战场平均寿命, 即一阶矩和二阶矩等。

首先, 从式 (8) 中导出部件 I 和部件 II 的边缘生存概率为:

$$\begin{cases} \bar{F}_1(y_1) = P\{Y_1 > y_1\} = \exp\{-\tau_1(p_{00} + p_{01})y_1\} \\ \bar{F}_2(y_2) = P\{Y_2 > y_2\} = \exp\{-[\tau_1(p_{00} + p_{10}) + \tau_2 p_2]y_2\} \end{cases} \quad (10)$$

即部件 I 和部件 II 的边缘分布都是指数分布, 又由式 (8) 知, (Y_1, Y_2) 的联合分布函数 $F(y_1, y_2)$ 为:

$$F(y_1, y_2) = P\{Y_1 \leq y_1, Y_2 \leq y_2\} = 1 - \bar{F}_1(y_1) - \bar{F}_2(y_2) + \bar{F}(y_1, y_2), \quad y_1, y_2 \geq 0 \quad (11)$$

由此可得到关于矩的表达式, 即部件 I 和部件 II 的平均寿命和方差为:

$$E[Y_1] = [\tau_1(p_{00} + p_{01})]^{-1}, \quad Var[Y_1] = [\tau_1(p_{00} + p_{01})]^{-2} \quad (12)$$

$$E[Y_2] = [\tau_1(p_{00} + p_{10}) + \tau_2 p_2]^{-1}, \quad Var[Y_2] = [\tau_1(p_{00} + p_{10}) + \tau_2 p_2]^{-2} \quad (13)$$

也可推导出部件 I 和部件 II 的互相关系数为:

$$E[Y_1 Y_2] = [\tau_1(1 - p_{11}) + \tau_2 p_2]^{-1} \{[\tau_1(p_{00} + p_{01})]^{-1} + [\tau_1(p_{00} + p_{10}) + \tau_2 p_2]^{-1}\} \quad (14)$$

$$\rho = Cov(Y_1, Y_2) = \frac{\tau_1 p_{00}}{\tau_1(1 - p_{11}) + \tau_2 p_2} \quad (15)$$

3 应用实例

1) 美国某型导弹在 1 000 h 战场生存试验中的数据统计数据如表 1。

表 1 美国某型导弹 1 000 h 战场生存实验数据统计表

	攻击次数	命中概率	部件 I 生存概率	部件 II 生存概率	部件 I 平均寿命	部件 II 平均寿命
传统攻击	93	0.874	0.035	0.032	命 13.7 h	命 12.6 h
新型攻击	6	0.966	0.991	0.017		

由表 1 可知:

$$\tau_1 = 0.093, \quad \tau_2 = 0.006,$$

$$p_{00} + p_{01} = 0.874 \times (1 - 0.035) = 0.843,$$

$$p_{00} + p_{10} = 0.874 \times (1 - 0.032) = 0.846,$$

$$p_2 = 0.966 \times (1 - 0.017) = 0.950, \text{ 则}$$

$$E[Y_1] = [\tau_1(p_{00} + p_{01})]^{-1} = 12.8 \text{ h}, \quad E[Y_2] = [\tau_1(p_{00} + p_{10}) + \tau_2 p_2]^{-1} = 11.9 \text{ h}, \text{ 与实际统计值接近。}$$

2) 根据统计数据, 在某一段区间内, p_{01} 和 p_{10} 与 p_{00} 满足简单线性关系, 即 $p_{01} = k_1(p_{00} - p_{10}), p_{10} = k_2(p_{00} - p_{01})$, 且 $p_{01} p_{10} = c p_{00}$, 则有:

$$p_{01} = k_c \sqrt{p_{00}}, \quad p_{10} = \bar{k}_c \sqrt{p_{00}}.$$

$$\text{其中, } k_c = \sqrt{\frac{k_{12}}{k_{21}}} c, \quad \bar{k}_c = \sqrt{\frac{k_{21}}{k_{12}}} c.$$

$$k_{12} = k_1(1 - k_2), \quad k_{21} = k_2(1 - k_1), \text{ 考察互相关系数,}$$

$$\rho^{-1} = 1 + \frac{p_{01} + p_{10}}{p_{00}} + \frac{\tau_2 p_2}{\tau_1 p_{00}} = 1 + \frac{k_c + \bar{k}_c}{\sqrt{p_{00}}} + \frac{\tau_2 p_2}{\tau_1 p_{00}} \quad (16)$$

式 (16) 说明, 在装备设计时, 首先应考虑减小 p_{00} , 使得机械系统和电子系统的相关性降低, 增加战场生存概率; 其次, 有 ρ 的极值为:

$$\min(\rho^{-1}) = 1 + \frac{2\sqrt{p_{01} p_{10}}}{p_{00}} + \frac{\tau_2 p_2}{\tau_1 p_{00}}, \text{ 在 } p_{00} = p_{01} + p_{10} \text{ 时}$$

取得。

(下转第 22 页)

表 3 各库所中的平均标识数

库所	平均标识个数	库所	平均标识个数
P ₁	0.011 5	s ₂	0.203 4
P ₂	0.134 8	P ₇	0.023 1
s ₁	0.581 0	P ₈	0.046 2

由表 3 看出, 库所 s₁ 中标识数较多, 易形成瓶颈, 这是由于初级目标处理子系统执行速率过慢的原因, 可以通过 2 种途径来提高初级目标处理子系统的执行速率: 一是提高子系统中关键时间变迁(对应于各类情报处理活动)的执行速率, 如将全脉冲辅助分选活动的执行速率 $\lambda_6 = 3.5$ 提高到 $\lambda_6 = 10$, 则整个系统的平均服务时间将加快 10 min; 二是改善系统结构, 增加多个子系统并行处理, 如在系统中令 3 个性能相同的初级情报处理子系统并行处理, 则整个系统的平均服务时间将加快 27 min。

5 结束语

该模型对基本 Petri 网中的托肯、库所、变迁、有向弧进行了扩展, 并引入了超变迁的概念, 大大加强了模型的描述和分析能力, 证明了 ESCPN 模型和连续时间的马尔可夫链是同构的, 从而可以利

(上接第 15 页)

[11] Przemieniecki J S. Mathematical methods in Defense Analyses[M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.1801 Alexander Bell Drive,Reston: VA, 2000: 20191-4344.

[12] 雷中原, 梁义芝, 王哲. 基于模糊综合评判的舰艇电子战系统作战效能评估[J]. 电子信息对抗技术, 2006, 21(4): 42-45.

[13] 苑立伟, 阳家宏, 赵保军. 基于模糊理论的防空导弹武器系统综合评估模型[J]. 装甲兵工程学院学报, 2005, 15(6): 24-29.

[14] James J Buckley, Esfandiar Eslami, Thomas Feuring. Fuzzy Mathematics in Economics and Engineering[M]. Heidelberg: Physical-Vedag, 2002.

[15] 郑昌, 董文洪, 牛庆功, 等. 基于 AHP 和模糊综合评

用基于 MC 状态方程的各种性能指标对电子对抗情报系统的性能参数进行分析, 进而找出电子对抗情报系统在工作过程中的瓶颈并提出有效的解决方案。实例中仅对时间性能参数进行了详细分析, 下一步, 将利用 MC 状态方程求解的各种性能指标对电子对抗情报系统其它多项性能参数进行分析, 如: 情报资源利用率、各子系统情报处理的吞吐量等。

参考文献:

[1] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[2] GiraultC, ValkR. 系统工程 Petri 网—建模、验证与应用指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

[3] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[4] Zuberek W K. Performance evaluation using unbound timed Petri nets[C]. Proceeding of the 3rd International Workshop on Petri Nets and Performance Models. Kyoto:[s. n.], 1989: 180-186.

[5] 王继曾, 张彦龙, 罗靖宇. 一种随机着色 Petri 网及模型的性能分析[J]. 计算机应用, 2008, 28(2): 292-293.

[6] 涂波. 基于 Petri 网的产品开发过程建模及系统性能分析[D]. 南昌: 南昌大学硕士学位论文, 2007.

[7] 尚书怀, 李敬辉, 黄高明, 等. 基于多 Agent 系统联合信息作战情报处理系统[J]. 四川兵工学报, 2009(10): 124-125.

判的无人机效能评估[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(6): 71-75.

[16] Heilpern S. Representation and Application of Fuzzy Number[J]. Fuzzy Sets and System, 1997, 97(5): 259-268.

[17] 邓可, 戴耀. 舰舰导弹武器系统作战效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2005, 30(3): 75-79.

[18] 吴智辉, 张多林. AHP 法评估地空导弹武器系统效能[J]. 战术导弹技术, 2003, 26(4): 8-12.

[19] 徐奕航, 原超, 王洪胜. 基于排队论的舰空导弹武器系统反导射击效能模型[J]. 指挥控制与仿真, 2007, 29(1): 77-80.

[20] 吴豫杰, 郑国民, 陈建宏. 防空兵指挥信息系统效能评估[J]. 四川兵工学报, 2009(3): 30-32.

(上接第 17 页)

即在外界传统攻击不改变的前提下, 若装备机械系统和电子系统单独失效的概率之和等于同时失效的概率, 则两系统形成“共振”, 互相关系数取得最大值, 不利于战场生存, 设计时应避免。

4 结束语

装备战场失效模型能为相关设计人员提供参考。但应注意: 在装备设计时, 应减小 p_{00} , 可增加战场生存概率; 在外界传统攻击不变的前提下, 如

相互关系系数是最大值, 即不利于战场生存。

参考文献:

[1] MIL-HDBK-338B. Military Handbook -Electronic Reliability Design Handbook[S]. Washington, Department of Defense, 1998.

[2] GJB/Z 299B-98. 电子设备可靠性预计手册[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 1998.

[3] 曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[4] Electronic Parts Reliability Data[DB]. (EPRD-97) Reliability Analysis Center (RAC), 1997.