

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.01.003

战时飞机部件损坏率分析

张作刚¹, 翟胜路¹, 王彦²

(1. 海军航空工程学院青岛分院航空装备保障指挥系, 山东 青岛 266041;

2. 海军航空工程学院兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001)

摘要: 为更加准确地预测现代战争条件下的飞机部件损坏率, 提出一种基于可靠性和兰彻斯特方程的飞机部件损坏率预测方法。着眼于影响战时飞机部件损坏的内外部因素, 在飞机部件中引入当量面积的概念, 在飞机能够生存的前提下, 根据各个部件受伤对飞机的生存影响, 运用兰彻斯特方程和可靠性工程理论计算该部件的战伤概率, 通过定性分析和定量计算, 得出战时飞机部件的损坏率, 并举例进行验证。实例结果证明: 该方法将经验计算和模拟计算相结合, 满足了未来作战维修保障精确化的需要。

关键词: 损坏率; 兰彻斯特方程; 当量面积; 部件战伤率

中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

Damages Rate Analysis of Aircraft Part in Warfare

Zhang Zuogang¹, Zhai Shenglu¹, Wang Yan²

(1. Dept. of Aeronautical Equipment Support & Command, Qingdao Branch, Naval Aeronautical & Astronautical University, Qingdao 266041, China;

2. Dept. of Ordnance Science & Technology, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: For the precise estimation of aircraft part damages in warfare, Lanchester Equation and reliability project theory are used to solve the problem. Focusing on the internal and external factors that affect the aircraft part damages, introduce the equivalent area into aircraft part, puts forward the estimation method of aircraft part damage based on reliability and Lanchester Equation by qualitative analyze and quantitative calculation, and illustrates with an example. This method combined the experience calculation with the analog calculation, can meet the need of accurate maintenance support in future warfare.

Key words: damage rate; Lanchester equation; equivalent area; the damage of aircraft part

0 引言

战时飞机部件损坏率预测是现代化作战条件下航空装备保障^[1]必须解决的一个核心问题, 也是当前航空装备保障的难点问题。现有的飞机部件损坏率预测基本上都是采用靶场试验和计算机仿真 2 种方法, 但大多数只是针对战损进行仿真研究, 没有考虑战时飞机部件的自身故障。因此, 笔者根据各个部件受伤对飞机的生存影响, 计算该部件的战伤概率。最后综合飞机部件的可靠性, 得出战时飞机部件的损坏率。

1 战斗损伤概率分析

1.1 飞机受击损坏率的计算

采用兰彻斯特方程对飞机的受击损坏率进行计算, 考虑双方战斗单位在某一作战类型和样式下, 一方战斗单位对另一方战斗单位的毁伤情况的预

测, 即根据飞机的战斗效能指标^[2], 计算战斗单位的整体战斗效能(等效战斗单位数)。单位时间内使对方飞机丧失战斗力数目与己方飞机的等效战斗单位数成正比。

模型建立的前提和假设为:

- 1) 同一战斗方、同一战斗级别的战斗单位, 其作战效能相同, 即等效战斗单位的战斗效能相同。
- 2) 双方均知道对手的位置, 每个战斗单位只对未被毁伤目标射击, 而且对各目标射击是等可能的。
- 3) 忽略不可量化的因素, 如士气、心理素质、坚持性等因素影响。
- 4) 如果飞机受损(包括战伤和战毁), 则飞机的战斗效能为零。

M_1 、 M_2 和 $M_1(t)$ 、 $M_2(t)$ 分别为红、蓝双方初始和战中 t 时刻飞机的等效战斗单位数, α 、 β 分别是红、蓝方一个等效战斗单位的战斗力。随着战斗的

收稿日期: 2011-08-05; 修回日期: 2011-09-19

作者简介: 张作刚(1961—), 男, 山东人, 教授, 硕士生导师, 从事装备、器材勤务技术研究。

进行, 战斗效能随着飞机的损坏而不断减少, 由兰彻斯特平方律可得:

$$\begin{cases} \frac{dM_1(t)}{dt} = -\beta M_2(t) \\ \frac{dM_2(t)}{dt} = -\alpha M_1(t) \end{cases} \quad (1)$$

对上式求解可得:

$$\beta(M_2^2 - M_2^2(t)) = \alpha(M_1^2 - M_1^2(t)) \quad (2)$$

设 $\frac{\beta}{\alpha} = k, t = t_0$ 时战斗结束, 假设蓝方交战失败, $M_2(t) = 0$, 红方飞机损坏率为 D , 则赢得战斗后红方飞机剩余等效战斗单位数为 $M_1(t_0) = M_1 - DM_1$, 代入式 (1) 求解可以得到红方飞机受击总损坏率 D 为:

$$D = \frac{M_1 - \sqrt{M_1^2 - kM_2^2}}{M_1} \quad (3)$$

式中: k 为蓝方与红方一个等效战斗单位战斗力之比; M_1 为红方交战开始后飞机等效战斗单位数总和; M_2 为蓝方交战开始后飞机等效战斗单位数总和; D 为飞机总损坏率。

1.2 飞机部件战伤概率计算

假设战斗中射弹破片落在飞机上的分布为均匀分布, 用 P_h 表示一架飞机战伤后各部件的战伤概率, 则 $P_h(i)$ 可以用第 i 个部件在破片飞散方向上的投影面积与飞机在破片飞散方向上总的投影面积之比来近似计算^[3]。由于破片从不同的方向飞来, 弹目结合条件很多, 为了简化, 引入当量面积的概念。

如图 1, 定义直角坐标系 $OXYZ$, 原点 O 在飞机重心, X 轴指向飞机运动方向为正, Y 轴指向飞机左机翼为正, Z 轴由右手定则确定。

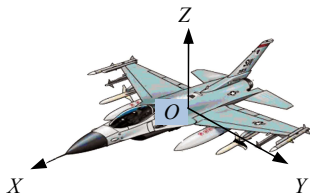


图 1 飞机几何参量坐标图

由于飞机上各个部件大小不一, 形状各异, 因此, 把部件模型化为长方体, 部件的大小由平行于 X, Y, Z 轴的长、宽、高确定, 这样, 就可以方便地确定部件的位置及大小。对于电缆、导管等部件,

采用聚合的方法, 即近似地认为它们并排在一起, 来估算其位置和大小^[4]。部件的当量面积 S 定义为该部件在 3 个坐标平面上的投影面积的平均值, 即:

$$S \approx \frac{1}{3}(S_{xoy} + S_{yoz} + S_{xoz}) \quad (4)$$

根据专家经验, 把某型飞机中的器材分为 n 项易战伤器材, 根据各器材的几何参量, 则被威胁击中的概率 $P_h(i)$ 可以通过式 (5) 得到:

$$P_h(i) = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (5)$$

飞机部件可分为要害部件和基本功能部件, 即要害部件受伤或技术故障可能导致飞机坠毁, 而基本功能部件受伤只是使飞机丧失了战斗力, 但能飞回基地进行维修。比如发动机遭受不可修复损伤时, 极可能导致战机坠毁, 而如果雷达遭受不可修复伤, 飞机丧失战斗力, 但基本能飞回基地进行维修。

部件遭受可修复损伤的概率 P_d , 是该部件被威胁击中的概率 P_h 与给定部件打击时部件遭受可修复损伤的概率 $P_{d/h}$ 之积^[5]:

$$P_d = P_h \times P_{d/h} \quad (6)$$

式中: P_h 为部件敏感性的量度, 一般取决于部件投影到威胁截击平面上的形状或范围, 以及威胁传播物的脱靶距离分布^[6]; $P_{d/h}$ 为部件易损性的量度, 对于部件的特定损伤模式, $P_{d/h}$ 的计算可以根据战伤仿真得到^[7]。

同理可以计算部件遭受不可修损伤的概率, 其中 $P_{k/h}$ 为部件被击中时遭受不可修损伤的概率^[7]。

$$P_k = P_h \times P_{k/h} \quad (7)$$

2 飞机部件技术故障损坏率预计模型

飞机部件按寿命分布可分为指数寿命件、正态寿命件、威布尔寿命件或随机失效件等几种典型形式。据统计, 寿命服从指数分布的部件约占全部部件的 90%。战时飞机部件的平均故障间隔时间 ($MTBF$) 可以采用平均故障间隔飞行小时来表示。假定部件在规定条件下和规定的时间内, 发生故障的概率称为该部件的故障函数^[8], 记作 $F(t)$, 并假定故障是由各种随机因素引起的, 即服从指数分布:

$$F = 1 - e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (8)$$

式中： θ 为平均故障间隔时间 (MTBF)， $\theta = \frac{1}{\lambda}$ ； t 为部件实际使用的时间。

则各部件故障率可以表示为：

$$F_i = 1 - e^{-\frac{t_i}{\theta_i}} \quad (9)$$

式中： F_i 为第 i 种部件的技术故障总损坏率； θ_i 为第 i 种部件的平均故障间隔使用时间 (次数)； t_i 为第 i 种部件实际使用时间。

3 战时飞机部件损坏率模型

由于在飞机战斗中，飞机受击损坏与技术故障损坏同时发生的概率很小，由式 (3)、式 (5) 和式 (6) 得到某次战斗的某个部件损坏率 S_i 为：

$$S_i = F_i + D \cdot P_h(i) \quad (10)$$

式中： F_i 为第 i 种部件的技术损坏率； $P(i)$ 为第 i 种部件的受击损坏率。

如果该部件属于要害部件，受伤影响飞机的生存，则该部件损伤率为 R_i ：

$$R_i = S_i \times P_{d/h}(i) \quad (11)$$

如果该部件是飞机非要害部件，受伤不影响飞机生存，则损伤率为 U_i ：

$$U_i = S_i \quad (12)$$

4 实例分析

假设红方飞机发动机 MTBF = 200 h，已经飞行 10 h，战斗持续 2 h，则根据式 (6) 可以得到战时飞机发动机技术故障损坏率：

$$F = 1 - e^{-\frac{12}{200}} \times 100\% = 5.7\% \quad (13)$$

表 1 给出了参战红方、蓝方的飞机数量、相对战斗效能及等效战斗单位数。假设红方取得胜利的情况下，对红方飞机损坏程度进行预计。其中 $k=1.5$ ，表示蓝方一个等效战斗单位与红方一个等效战斗单位之比为 1.5。

表 1 作战双方装备战斗效能对照表

名称	相对战斗效能	装备数量	等效战斗单位数
红方某型飞机	120	30	3.6
蓝方某型飞机	120	15	1.8

表 2 假设打击方向上飞机部分部件损伤数据

名称	可修损伤概率 $P_{d/h}$	不可修损伤概率 $P_{k/h}$	击中概率 P_h
发动机	0.50	0.020	0.070
油箱	0.45	0.020	0.020
雷达	0.60	0.030	0.016

以发动机为例，该部件为要害部件，由表 2 知击中概率 0.07，已知 $M_1 = 2.4$ ， $M_2 = 2.88$ ， $K = 1.5$ ，由式 (2) 可得飞机的受击总损坏率 D 为：

$$D = \frac{3.6 - \sqrt{3.6^2 - 1.5 \times 1.8^2}}{3.6} \times 100\% = 19.4\% \quad (14)$$

则由式 (10) 得，该型飞机发动机的战损率为：

$$S_i = (0.057 + 0.194 \times 0.070) \times 100\% = 7\% \quad (15)$$

由式 (11) 得出该型飞机发动机的战伤率为：

$$R_i = 7\% \times 0.50 = 3.5\% \quad (16)$$

5 结论

笔者以参战单位编制内的飞机为研究对象，从部件的技术故障和受击损坏 2 个方面出发，引入当量面积的概念，建立了飞机部件技术故障损坏率预计模型和受击损坏率预计模型，以及战时飞机部件损坏率预计模型，初步实现了装备损坏率的精确预计。

参考文献：

- [1] 孔令茂, 牛跃峰. 战术装备保障学[M]. 北京: 国防大学出版社, 2001.
- [2] 王小非. 海军作战模拟理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [3] 石全, 米双山, 等. 装备战伤理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [4] 陈精卫, 汪伦根, 曹银, 等. 武器装备战场损伤评估[J]. 四川兵工学报, 2011, 31(4): 16.
- [5] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [6] Kaplan B J, Wallick D J. Aircraft battle damage repair (BDR) analysis methodology development requirements, revision 1[R]. AD-A304292, 1994.
- [7] 裴扬. 飞机非核武器威胁下易损性定量计算方法研究[D]. 西安: 西北工业大学航空学院, 2006.
- [8] 冯精, 孙权, 等. 装备可靠性与综合保障[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2008.