基于飞行剖面的作战飞机任务可靠性评估方法

刘震宇 马小兵 洪东跑 赵 宇

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要:针对作战飞机故障数据的特点,分析了作战飞机不同飞行剖面对其任务可靠性的影响.在此基础上,定义了飞行剖面折合系数、建立了作战飞机任务可靠性模型.基于该模型给出了作战飞机在不同飞行剖面下的任务可靠性评估方法.针对想定任务剖面,采用剖面合成的方法把其处理为典型飞行剖面的线性组合,并由此给出了作战飞机在想定剖面下任务可靠性的预测方法.实例表明基于飞行剖面的作战飞机任务可靠性评估方法合理可行,便于工程应用.

关 键 词: 作战飞机; 飞行剖面; 可靠性评估; 环境折合系数

中图分类号: TB 114.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)01-0059-05

Mission reliability assessment for battle-plane based on flight profile

Liu Zhenyu Ma Xiaobing Hong Dongpao Zhao Yu

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The mission reliability of battle-plane varied under different flight profiles. According to the characteristics of battle-plane's fault data, the flight profile conversion factor was introduced to establish the mission reliability model of battle-plane. Based on the model, the statistical inference method of failure rate for battle-plane was proposed, and the mission reliability was assessed under a given flight profile. For a scenario flight profile, a synthetic method was used to describe it as a weighted combination of typical profiles. Thus, the prediction method of mission reliability under the scenario flight profile was put forward by using the failure rates under typical profiles. The illustrative example shows that the method is reasonable and straightforward for engineering.

Key words: battle-plane; flight profile; reliability assessment; environment conversion factor

可靠性是衡量作战飞机持续作战能力的重要特性,对作战飞机进行可靠性评估具有重要工程意义[1].通过可靠性评估可以明确装备可靠性的薄弱环节,为评价装备的作战适用性和作战效能提供依据[2].作战飞机作为复杂装备系统,其任务可靠性受作战条件的影响较大,其中作战条件包括作战环境条件和作战模式.在不同的作战条件下,作战飞机的任务可靠性会表现出不同的水平.因此在对作战飞机任务可靠性进行评估时需要考虑作战条件的差异对任务可靠性的影响.

鉴于作战飞机的特点,收集到的可靠性数据通常为其在一定日历时间内执行多个飞行剖面后累计产生的故障数据.而且在不同的飞行剖面下,飞机的作战条件存在较大的差异[3].传统的作战飞机任务可靠性评估方法未考虑飞机在不同飞行剖面下所表现出来的差异,会造成较大的偏差.为了较好地评价作战飞机在飞行训练、作战演习乃至实战条件下的任务可靠性水平,本文从飞行剖面的角度出发,研究作战条件对飞机任务可靠性的影响,综合利用不同飞行剖面下的故障数据,给

收稿日期: 2010-09-30; **网络出版时间**: 2011-12-27 10:38; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111227.1038.007

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111227.1038.007.html

基金项目: 总装预先研究项目(513190401); 国家自然科学基金资助项目(11001005,61104133)

作者简介: 刘震宇(1987 -),男,湖北荆门人,博士生,lzy@dse.buaa.edu.cn.

出了一种基于飞行剖面的任务可靠性评估方法.

1 基于飞行剖面的任务可靠性模型

1.1 飞行剖面定义

飞行剖面是指为完成某一特定飞行任务而绘制的飞机航迹图形,是飞机战术技术要求的组成部分和重要设计依据,也是形象地表达飞行任务的一种形式. 与一般飞机装备不同,根据任务的需要,作战飞机的飞行剖面主要分为截击、空中优势、空中封锁、战斗巡逻、战斗侦察等十几种. 飞行剖面以起飞基地为原点,由若干种任务段组成,包括滑行、起飞、爬升、巡航、待机、机动、空-空、空-地、巡航、下滑、着陆和着陆滑行等[4]. 在每个任务段上,一般都标明飞行速度、高度、飞行时间等. 如图 1 所示,作战飞机常用的飞行剖面包含上述全部或部分任务段.

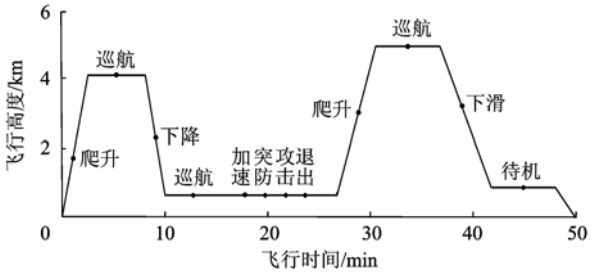

图 1 作战飞机典型飞行剖面示意图

1.2 飞行剖面折合系数

在不同的飞行剖面下,作战飞机承受的载荷条件存在较大的差异,从飞行参数的角度可知该差异主要体现在飞行高度、速度和加速度 3 个方面. 这 3 个参数对飞机任务可靠性的影响又表现为气压、振动和过载 3 个因素. 飞机的非密舱内设备的气压环境主要取决于飞行高度. 在飞行剖面中,气压低于标准大气压,低气压会引起物理/化学效应、热效应和电效应等,这些效应会导致机载设备故障[3],从而影响任务可靠性. 振动是影响作战飞机任务可靠性的另一个重要因素,振动主要由动压引起,而动压又由飞行高度和速度决定. 过载主要由飞行加速度引起,对飞机任务可靠性影响较大,对大部分机载设备包括机械、电子、材料、涂面和密封装置等都会有较大影响[5].

由此可见作战条件的差异会导致在不同飞行剖面下作战飞机的可靠性水平不一致. 为了综合利用不同飞行剖面下的飞机故障数据,可参照环境折合系数的概念[6-7],定义飞行剖面折合系数,并据此对作战飞机不同飞行剖面下的故障数据进行等效折合. 假设产品在环境条件Ⅰ和Ⅱ下的可靠度函数分别为 $R_1(t)$ 和 $R_2(t)$,且分布类型相同. 以可靠度不变为准则可知折合系数 k 满足

$$\left.\begin{aligned} k &= \frac{t_2}{t_1} \\ \text{s.t. } & R_1(t_1) = R_2(t_2) \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

即产品在环境条件Ⅰ下的寿命 t_1 相当于在环境条件Ⅱ下的寿命 kt_1.

对于作战飞机这类复杂可修系统,假设其故障间隔时间在不同飞行剖面下均服从指数分布,选择作战飞机最常用的飞行剖面作为基准剖面. 设在基准剖面 x_0 下的故障率为 λ_0,可靠度函数为 $R_0(t_0)=\mathrm{e}^{-\lambda_0 t_0}$;在飞行剖面 x_i 下的故障率为 λ_i,可靠度函数为 $R_i(t_i)=\mathrm{e}^{-\lambda_i t_i}$. 基于上述假设,由式(1)可得剖面 x_i 对基准剖面 x_0 的折合系数 k_i 满足:

$$k_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_0} \tag{2}$$

1.3 可靠性模型

作战飞机的飞行剖面类型较多,但是在有些剖面下其作战条件差异较小. 为了便于工程应用,对其进行分类,分类原则[8]如下:

1) 在同一类型飞行剖面下,任务内容基本相同;

2) 在同一类型飞行剖面下,飞行高度、速度、过载变化范围及次序基本相近;

3) 在同一类型飞行剖面下,任务的一次飞行时间基本相近.

按照以上原则,将作战飞机的飞行剖面分为 n 类,记为 $\boldsymbol{X}=(x_1,x_2,\cdots,x_n)^{\mathrm{T}}$. 与常用的故障数据不同,作战飞机的故障数据为其在给定日历时间内执行多个飞行剖面后累计产生的故障数据. 假设在日历时间 t_s 内,有 m 架飞机执行了多次不同的飞行任务,记第 j 架飞机在剖面 $\boldsymbol{X}=(x_1,x_2,\cdots,x_n)^{\mathrm{T}}$ 下的飞行时间为 $\boldsymbol{T}_j=(t_{j1},t_{j2},\cdots,t_{jn})^{\mathrm{T}}$(如果在剖面 x_i 下没有飞行,记 $t_{ji}=0$;如果在剖面 x_i 下飞行多次,则 t_{ji} 为多次飞行时间的总和),故障数为 f_j. 则作战飞机的故障数据信息可表示为

$$(\boldsymbol{T}_j, f_j, \boldsymbol{X}) \quad j=1,2,\cdots,m \tag{3}$$

把其他剖面下的飞行时间折合到基准剖面下,则有

$$\sum_{i=1}^{n} k_i t_{ji}\lambda_0 = f_j + \varepsilon_j \quad j=1,2,\cdots,m \tag{4}$$

其中 ε_j 为 0 均值的随机变量. λ_0 通常是未知的,把式(2)代入式(4)可得

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i t_{ji} = f_j + \varepsilon_j \quad j=1,2,\cdots,m \tag{5}$$

由式(5)可知,可靠性模型与基准故障率 λ_0 无关. 记 $\boldsymbol{B}=(\boldsymbol{T}_1,\boldsymbol{T}_2,\cdots,\boldsymbol{T}_m)^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{F}=(f_1,f_2,\cdots,f_m)^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{\lambda}=(\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_n)^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{\varepsilon}=(\varepsilon_1,\varepsilon_2,\cdots,\varepsilon_m)^{\mathrm{T}}$, 则式(5)可以表示为如下矩阵形式:

$$\boldsymbol{B\lambda}=\boldsymbol{F}+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{6}$$

对作战飞机而言,除飞行剖面外,地面停放环境也会引起机载设备故障. 实际收集到的故障数据为作战飞机在一定日历时间内的累计故障数,必然包括执行飞行任务和地面停放期间导致的故障. 因此在利用该故障数据进行可靠性建模时,应考虑地面停放对作战飞机可靠性的影响,为便于建模,可将地面停放阶段处理为特定飞行剖面. 记第 j 架飞机的累计地面停放时间为 z_j,把地面停放时间和其他剖面下的飞行时间折合到基准剖面下,则有

$$\sum_{i=1}^{n}k_it_{ji}\lambda_0+k_ez_j\lambda_0=f_j+\varepsilon_j\quad j=1,2,\cdots,m \tag{7}$$

记飞机在地面停放时的故障率为 λ_e,则 $\lambda_e=k_e\lambda_0$,式(7)变为

$$\sum_{i=1}^{n}\lambda_it_{ji}+\lambda_ez_j=f_j+\varepsilon_j\quad j=1,2,\cdots,m \tag{8}$$

记 $\boldsymbol{Z}=(z_1,z_2,\cdots,z_m)^{\mathrm{T}}$,则式(8)可表示为如下矩阵形式:

$$\boldsymbol{B\lambda}+\boldsymbol{Z}\lambda_e=\boldsymbol{F}+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{9}$$

令 $\lambda_{n+1}=\lambda_e$, $\boldsymbol{H}=(\boldsymbol{B},\boldsymbol{Z})$,式(6)和式(8)可统一表示为

$$\boldsymbol{H\lambda}=\boldsymbol{F}+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{10}$$

2　作战飞机任务可靠性评估

假如已知 m 架飞机的飞行时间和故障数,即已知 $\boldsymbol{H}$ 和 $\boldsymbol{F}$,当故障数据中飞机的架数 m 大于剖面个数 n 时,根据 Gauss-Markov 定理可得折合系数的估计如下:

$$\hat{\boldsymbol{\lambda}}=(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F} \tag{11}$$

假设 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 服从正态分布,则有 $\hat{\boldsymbol{\lambda}}\sim N(\boldsymbol{\lambda},\hat{\sigma}^2(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H})^{-1})$,其中 $\hat{\sigma}^2=\dfrac{\|\boldsymbol{F}-\boldsymbol{H}\hat{\boldsymbol{\lambda}}\|^2}{(m-n)}$ 为 σ^2 的无偏估计, $\|\boldsymbol{F}-\boldsymbol{H}\hat{\boldsymbol{\lambda}}\|^2=\sum_{j=1}^{m}\left(\sum_{i=1}^{n}\hat{\lambda}_it_{ji}-f_j\right)^2$. 给定置信水平 $1-\alpha$,可得 λ_i 的置信区间为 $[\hat{\lambda}_i-z_{1-\alpha/2}\hat{\sigma}\sqrt{c_i},\hat{\lambda}_i+z_{1-\alpha/2}\hat{\sigma}\sqrt{c_i}]$,其中 c_i 为 $(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H})^{-1}$ 的第 i 个对角元素,$z_{1-\alpha/2}$ 为标准正态分布的 $1-\alpha/2$ 分位点.

给定任务时间 t,由此可得作战飞机在剖面 x_i 下的可靠度估计:

$$R(t\mid x_i)=\exp(-t\hat{\lambda}_i) \tag{12}$$

给定置信水平 $1-\alpha$ 和任务时间 t,可得作战飞机在剖面 x_i 下的可靠度置信下限为

$$R_{\mathrm{L}}(t\mid x_i)=\exp(-t(\hat{\lambda}_i+z_\alpha\hat{\sigma}\sqrt{c_i})) \tag{13}$$

3　基于剖面合成的任务可靠性预测

在某些特定场合下,可能要制定新的飞行剖面,此时需要对想定飞行剖面下的作战飞机进行可靠性预测. 由于难以获得该剖面下的故障数据,无法利用上述方法对作战飞机在该剖面下的任务可靠性进行评估. 然而,飞行剖面是由若干任务段组成的,通过对剖面进行分析,可以将想定飞行剖面处理为由已有剖面中任务段合成的剖面.

假设飞行剖面一共可以分为 q 个任务段,记作战飞机在剖面 x_i 下的飞行任务时间为 t_i,其中第 j 个任务段时间为 t_{ij}(如果飞行剖面 x_i 不包含第 j 个任务段,则记 $t_{ij}=0$). 记飞机在想定剖面 x_s 下的飞行任务时间为 t_s,其中第 j 个任务段时间为 t_{sj}. 假设想定剖面 x_s 由 q 个剖面 $(x_1,x_2,\cdots,x_q)^{\mathrm{T}}$ 合成,合成的原则为剖面 $\boldsymbol{X}=(x_1,x_2,\cdots,x_q)^{\mathrm{T}}$ 中各任务段时间的加权线性组合分别等于想定剖面 x_s 中相应任务段的时间,则有

$$\sum_{i=1}^{q}l_it_{ij}=t_{sj}\quad j=1,2,\cdots,q \tag{14}$$

其中 l_1, l_2, …, l_q 为加权系数. 令 $\boldsymbol{l}=(l_1,l_2,\cdots,l_q)^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{T}=(t_{s1},t_{s2},\cdots t_{sq})^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix}t_{11}&\cdots&t_{1q}\\ \vdots&\ddots&\vdots\\ t_{q1}&\cdots&t_{qq}\end{pmatrix}$,则式(14)可表示为如下矩阵形式:

$$\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{l}=\boldsymbol{T} \tag{15}$$

由式(15)可得

$$\boldsymbol{l}=(\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}})^{-1}\boldsymbol{T} \tag{16}$$

记飞行剖面 x_s 下作战飞机的故障率为 λ_s,则在 t_s 任务时间内故障数为 $f_s=\lambda_st_s$,同样作战飞机在剖面 x_i 下的故障数为 $f_i=\lambda_it_i$. 由剖面的合成原则可知,作战飞机在想定剖面下的故障数等价于已有剖面下故障数的线性组合,则有

$$\lambda_st_s=\sum_{i=1}^{q}l_i\lambda_it_i \tag{17}$$

把 l_i 和 $\hat{\lambda}_i(i=1,2,\cdots,q)$ 代入式(17)可得作战飞机在想定剖面下的故障率估计:

$$\hat{\lambda}_s=\frac{1}{t_s}\sum_{i=1}^{q}\hat{\lambda}_il_it_i \tag{18}$$

式中 $t_s = \sum_{j=1}^{q} t_{sj}$.

记 $\boldsymbol{D} = (d_1, d_2, \cdots, d_q)^{\mathrm{T}}$, 其中 $d_i = \frac{l_i t_i}{t_s}$. 由 $\hat{\boldsymbol{\lambda}} \sim N(\boldsymbol{\lambda}, \hat{\sigma}^2 (\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H})^{-1})$ 可知 $\hat{\lambda}_s \sim N(\lambda_s, \sigma^2 w)$, 其中 $w = \boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{D}$. 给定置信水平 $1-\alpha$, 可得 λ_s 的置信区间为 $[\hat{\lambda}_s - z_{1-\alpha/2}\hat{\sigma}\sqrt{w}, \hat{\lambda}_s + z_{1-\alpha/2}\hat{\sigma}\sqrt{w}]$.

给定任务时间 t, 可得作战飞机在想定剖面 x_s 下的任务可靠度估计为

$$R(t \mid x_s) = \exp(-t\hat{\lambda}_s) \tag{19}$$

给定置信水平 $1-\alpha$ 和任务时间 t, 可得作战飞机在想定剖面 x_s 下的可靠度置信下限为

$$R_{\mathrm{L}}(t \mid x_s) = \exp(-t(\hat{\lambda}_s + z_\alpha \hat{\sigma}\sqrt{w})) \tag{20}$$

4 实 例

根据剖面分类原则, 可把某型作战飞机的飞行剖面分为 4 类, 记为 $\boldsymbol{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^{\mathrm{T}}$, 在每类剖面下的总飞行时间记为 $\boldsymbol{T} = (t_{z1}, t_{z2}, t_{z3}, t_{z4})^{\mathrm{T}}$, 地面停放累计时间记为 t_e, 故障数记为 f, 现收集到 6 架该型作战飞机在各自给定日历时间内的累计故障数据信息, 如表 1 所示.

表 1 某型作战飞机的故障数据

编号	t_{z1}/h	t_{z2}/h	t_{z3}/h	t_{z4}/h	t_e/h	f
1	3.6	12.8	7.77	21.26	5 597.66	15
2	10.15	14.13	29.83	1.46	4 124.06	13
3	18.76	33.42	24.66	9.89	5 963.25	22
4	12.86	67.91	54.78	0	3 740.265	27
5	3.71	10.53	12.82	13.14	992.375	12
6	7.93	12.4	10.43	12.99	1 050.325	12

1) 作战飞机传统任务可靠性评估.

记作战飞机的平均致命故障间隔时间 (MTBCF) 为 T, 任务时间为 t. 对于式 (3) 所示的作战飞机故障数据, 由传统任务可靠性评估方法可得作战飞机的任务可靠度估计为

$$\hat{R} = \exp\left(-\frac{t}{\hat{T}}\right) \tag{21}$$

给定置信水平 $1-\alpha$, 可得作战飞机的任务可靠度置信下限为

$$\hat{R}_{\mathrm{L}} = \exp\left(-\frac{t\chi^2_{1-\alpha}(2r)}{2\hat{T}}\right) \tag{22}$$

式中 $\hat{T} = \dfrac{\sum_{j=1}^{m} T_j}{\sum_{j=1}^{m} f_j}$ $\quad r = \sum_{j=1}^{m} f_j$

其中, T_j 和 f_j 分别为第 j 架飞机在给定日历时间内的的总飞行时间和故障数.

给定任务时间 $t = 0.5$, 将表 1 数据代入式 (21) 可求得可靠度估计 $\hat{R} = 0.8834$. 给定置信水平 0.9, 任务时间 $t = 0.5$, 可得作战飞机的任务可靠度下限 $R_{\mathrm{L}} = 0.8693$.

2) 不考虑地面停放影响的任务可靠性评估.

结合表 1 的数据利用式 (11) 可求得

$\hat{\boldsymbol{\lambda}} = (0.3456, 0.1559, 0.2202, 0.4595)^{\mathrm{T}}$

假设飞机在剖面 $(x_1, x_2, x_3, x_4)^{\mathrm{T}}$ 下飞行时间分别为 $(0.5, 0.5, 0.5, 0.5)^{\mathrm{T}}$ h. 以剖面 x_1 为例, 由式 (12) 可得任务可靠度的估计 $\hat{R} = 0.8413$. 给定置信水平 0.9, 计算可得 MTBCF 下限为 2.3112, $\hat{\sigma} = 0.7513$, $c_1 = 0.0082$, $z_{0.9} = 1.2816$, 可靠度下限为 $R_{\mathrm{L}} = 0.8055$. 作战飞机在 4 个飞行剖面下的任务可靠性评估结果如表 2 所示.

表 2 不考虑地面停放时间的可靠性评估结果

剖面	MTBCF 值/h	MTBCF 下限/h	任务可靠度 R	任务可靠度下限 R_{L}
x_1	2.8938	2.3112	0.8413	0.8055
x_2	6.4152	4.99	0.9250	0.9047
x_3	4.5421	3.6228	0.8958	0.8711
x_4	2.1762	2.0023	0.7947	0.7790

3) 考虑地面影响的任务可靠性评估.

若需考虑地面停放时间对作战飞机可靠性的影响, 把地面停放看成一个飞行剖面. 此时作战飞机在 4 个飞行剖面下的任务可靠性评估结果如表 3 所示.

表 3 考虑地面停放时间的可靠性评估结果

剖面	MTBCF 值/h	MTBCF 下限/h	任务可靠度 R	任务可靠度下限 R_{L}
x_1	3.2272	2.4088	0.8565	0.8126
x_2	6.2893	4.8498	0.9236	0.9020
x_3	4.733	3.6818	0.8997	0.8730
x_4	2.2898	2.0405	0.8038	0.7827

4) 想定剖面下的作战飞机可靠性预测.

在对想定剖面下的作战飞机进行可靠性预测时, 首先分析本例中的 4 个飞行剖面, 用于合成想定剖面. 将任务段分成 4 类, 每类任务段的飞行时间记为 $(t_{q1}, t_{q2}, t_{q3}, t_{q4})^{\mathrm{T}}$. 该作战飞机的 4 类飞行剖面 $\boldsymbol{X}$ 以及想定剖面 x_s 中各任务段的时间如表 4 所示.

表 4 各任务段下的飞行时间

剖面	t_{q1}/min	t_{q2}/min	t_{q3}/min	t_{q4}/min
x_1	5.47	37.75	13.18	9.33
x_2	8.15	22.07	8.37	10.12
x_3	10.15	28.16	10.13	7.17
x_4	7.72	23.64	9.51	8.03
x_s	9.52	31.54	11.79	9.21

结合表 4 的数据由式(6)可解得加权系数$\hat{\boldsymbol{l}}=(0.1803,0.0545,0.4245,0.4898)^{\mathrm{T}}$. 由式(18)得作战飞机在想定剖面下的 MTBCF 为2.9965,给定任务时间 $t=0.5$,由式(19)可得可靠度估计 $\hat{R}=0.8463$. 给定置信水平 0.9,任务时间 $t=0.5$,由式(20)可得作战飞机在想定飞行剖面 x_s 下的可靠度下限 $\hat{R}_L=0.8370$.

5) 结果比较分析.

对比传统方法计算得到的作战飞机任务可靠度估计和表 2 中的相应结果,可见传统的作战飞机任务可靠性评估结果仅体现了各类飞行剖面下可靠性的平均水平,而不能反应出飞机在不同飞行剖面下可靠性水平的差异特性.

由表 2 和表 3 对比分析可知,考虑地面停放时间与否对作战飞机任务可靠性评估结果影响较大. 因此,在地面停放时间较长或者地面停放环境较为恶劣时,需要将地面停放作为一个特定飞行剖面来对作战飞机进行任务可靠性评估.

5　结　论

针对作战飞机故障数据的特点,从飞行剖面角度出发,定义了飞行剖面折合系数. 在此基础上对不同剖面下的故障数据进行等效折合,并将地面停放阶段处理为一种特定飞行剖面,从而实现了不同飞行剖面下的可靠性综合评估. 针对想定飞行剖面,利用剖面合成方法,把想定剖面等效于已有剖面的线性组合,进而利用作战飞机在已有剖面下的可靠性评估结果来预测其在想定剖面下的任务可靠性. 该方法可考虑飞行剖面的差异对作战飞机任务可靠性的影响,提高对其可靠性水平进行量化的精度.

参考文献(References)

[1] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册第 20 册:可靠性、维修性设计[M]. 北京:航空工业出版社,1999:414 - 418
The general editorial board of the aircraft design manual. Aircraft design manual part 20: reliability and maintainability design [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1999: 414 - 418 (in Chinese)

[2] Sohn S Y, Yoon K B, Chang I S. Random effects model for the reliability management of modules of a fighter aircraft[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(4): 433 - 437

[3] MIL-STD-810F Test method standard for environmental engineering considerations and laboratory tests[S]

[4] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册第 4 册:军用飞机总体设计[M]. 北京:航空工业出版社,2005:18 - 22
The general editorial board of the aircraft design manual. Aircraft design manual part 4: military aircraft design[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005: 18 - 22 (in Chinese)

[5] Shi Q, Tian J, Man Q. Damage effect analysis and experiment for electronic equipment in impact vibration environment[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 20(6): 1384 - 1388

[6] Elsayed E A, Wang H Z. Bayes & classical estimation of environmental factors for the binomial distribution[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1996, 45(4): 661 - 665

[7] 洪东跑,马小兵,赵宇,等. 基于比例风险模型的环境折合系数确定方法[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(4):443 - 446
Hong Dongpao, Ma Xiaobing, Zhao Yu, et al. Environment referring factor based on proportional hazards model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(4): 443 - 446 (in Chinese)

[8] 刘文斑. 结构可靠性设计手册[M]. 北京:国防工业出版社,2008:493 - 501
Liu Wenting. Design handbook for structural reliability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 493 - 501 (in Chinese)

(编　辑:李　晶)