

环境因子对舰载机金属构件维修检查间隔期的影响

何志良¹, 蔡增杰², 周立建¹

(1. 海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041)

摘要: 结合金属构件腐蚀的影响因素和原理, 定义了海洋环境因子; 研究了海洋环境对舰载机金属构件维修检查间隔期的影响, 并通过例证对舰载机金属构件的维修检查间隔期进行了调整, 为舰载机在海洋环境下金属构件的维修决策提供了可靠的依据。

关键词: 金属腐蚀; 海洋环境因子; 检查间隔期; 舰载机

中图分类号: V216.6 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)05-0047-04

Impact of Environmental Factors on Maintenance Inspection Intervals of Carrier-based Aircraft Metallic Components

HE Zhi-liang¹, CAI Zeng-jie², ZHOU Li-jian¹

(Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 264001, China)

Abstract: Marine environmental factors were defined according to the principles and influencing factors of metal components corrosion. The influence of marine environment on inspection intervals of metal components was studied. The inspection intervals of metal components on carrier-based aircrafts were adjusted according to the results. The purpose was to provide reliable basis for maintenance strategy of metal components on carrier-based aircrafts under marine environment.

Key words: metal corrosion; marine environmental factors; inspection intervals; carrier-based aircraft

环境因子是可靠性工程中一个非常重要的参数, 它表征的是相同产品在不同量级的环境中失效的快慢程度, 反映了环境的严酷等级^[1]。环境因子首先出现于不同环境下可靠性信息的折算与综合研究中, 比如外场可靠性信息与实验室可靠性信息。钱学森于1965年提出的天地折合问题, 即产品的地面试验信息与飞行试验信息的折算与综合问题, 实际上就包含了环境因子问题。近年来, 环境因子还被

引入到加速寿命试验的研究中, 利用环境因子包含的环境信息进行加速应力到实际应力的可靠性信息折算与综合。

1 海洋环境对舰载机LY12铝合金的影响因素

舰载机的服役环境包括空中飞行环境和甲板停

收稿日期: 2011-06-07

作者简介: 何志良(1986—), 男, 湖南益阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为舰载机技术发展与应用。

放环境。由于舰载机长期停放和飞行在高温、高湿度、高盐雾的环境中,使舰载机的使用环境与内陆空军、陆航的飞机服役环境不同,导致舰载机的腐蚀状况尤为严重。总体上,海洋环境因素可分为2大类:气候环境因素和化学环境因素。

1.1 气候环境因素

气候环境因素主要有:气温、湿度、降水量、固体沉降物、风、雾、盐等^[2]。舰载机在甲板停放期间引起的自然腐蚀主要是大气腐蚀。对大气腐蚀程度有决定性影响的因素主要有:温度、相对湿度、雾和凝露、降水、固体沉降物、太阳辐射,其中高温度、高湿度和高盐度形成了金属发生电化学腐蚀反应的适宜环境,是舰载机金属构件腐蚀的最主要的影响因素。

1.2 化学环境因素

影响金属结构腐蚀的化学环境因素主要是具有侵蚀性物质的工业废气、盐雾及酸雨(即 SO_2 , SO_3 , NO_x , Cl^-)等。这些介质对金属的腐蚀速率有较大影响,是研究金属腐蚀必须考虑的重要海洋环境参数。

2 海洋环境因子的数学模型

2.1 基本假设

由于现实环境具有复杂多样性,根据研究的条件和目的提出以下假设。

1) 失效机理一致性假设^[3]:在不同的环境 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 下,产品的失效机理保持不变。该假设是进行海洋环境因子相关问题研究的前提条件,只有在失效机理保持一致性的情况下,才能进行不同应力水平下可靠性信息的折算与综合,环境因子的研究才具有意义。

2) 分布同族性假设:在不同的环境 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 下,产品的寿命服从同一形式的分布。该假设表明不同应力水平下的寿命数据的分布形式相同,只是在分布参数上存在差异。这既符合实际情况也便于分析研究。

3) Nelson假设:产品的残存寿命仅依赖于已累积的失效和当前应力,而与累积方式无关。这一假设是Nelson提出的,实际上是将累积失效概率作为

环境对产品损伤作用的外在表现,认为即使在不同环境下只要产品的累积失效概率相同则产品中累积的损伤相同,即在不同应力水平下作用不同时间的效果相当。

2.2 海洋环境因子的数学定义模型

Nelson假设的数学含义为:若产品在环境应力 P_1 作用时间 t_1 内的累积失效概率 $F_1(t_1)$ 与产品在环境应力 P_2 作用时间 t_2 内的累积失效概率 $F_2(t_2)$ 相等,即 $F_1(t_1)=F_2(t_2)$,则损伤累积相同。这一原理可以作为对不同环境下的寿命数据进行折算的依据,由此可以对海洋环境因子作出如下定义。

定义1:若 $F_1(t_1), F_2(t_2)$ 分别表示产品在试验室环境 P_1 和海洋环境 P_2 作用下的累积失效概率,且存在 $F_1(t_1)=F_2(t_2)$,则环境 P_2 对环境 P_1 的海洋环境因子为:

$$K=t_2/t_1 \quad (1)$$

2.3 海洋环境因子的微观原理模型

通过研究可知,舰载机金属材料机体结构的绝大部分腐蚀都是电化学腐蚀,电化学腐蚀有2大特点:1)金属表面湿润,在水膜覆盖下才能进行;2)必须有一定的反应时间,二者缺一不可^[4]。表征电化学腐蚀程度的指标很多,主要有腐蚀前后的质量变化、腐蚀深度、单位面积上腐蚀点数及点蚀因子等。这些都是宏观上的表现,在微观和本质上表现为电子的得失。

舰载机结构发生电化学腐蚀时,阳极为金属的氧化溶解,其电化学反应通式可写为:



式中:M为金属; M^{n+} 为金属离子; e 为电子; n 为参与反应的电子数。

从电化学原理可知,在金属电化学腐蚀中参与反应的电子数目越多,那么参与氧化溶解的金属就越多,宏观上金属腐蚀越严重。电子的数目又可以用电流的大小来衡量,并且可以通过电流计测量得到。对同一种金属结构,在不同的环境因素作用下,利用所测得的腐蚀电流 I 就可以对比金属结构的腐蚀速率。假设环境作用的时间为 t ,那么时间 t 内的金属腐蚀量为:

$$\Delta W = \varepsilon \cdot Q = \varepsilon \cdot I \cdot t = \varepsilon \cdot j \cdot S \cdot t \quad (3)$$

式中: ΔW 为析出或溶解的物质的质量; ε 为电化当量; Q 为腐蚀电量; I 为电流; j 为电流密度; S 为金属的面积。

对舰载机的同一种构件分别在试验室和海洋环境下进行腐蚀试验时, 设腐蚀量分别为 ΔW_1 和 ΔW_2 。根据定义1, 当腐蚀损伤等效时有:

$$\Delta W_1 = \varepsilon \cdot Q_1 = \varepsilon \cdot I_1 \cdot t_1 = \varepsilon \cdot I_2 \cdot t_2 = \varepsilon \cdot Q_2 = \Delta W_2 \quad (4)$$

$$I_1 \cdot t_1 = I_2 \cdot t_2 \quad (5)$$

定义海洋环境因子 K 为:

$$K = t_1/t_2 = I_2/I_1 \quad (6)$$

这说明海洋环境因子可以简化为在2种环境下材料发生电化学反应的腐蚀电流之比。

2.4 加速实验下的海洋环境因子

舰载机各个零部件的腐蚀情况一般是它的局部环境起决定作用, 但局部环境受工作性质的影响和位置的不同差距很大, 而且局部环境的多数参数都是由总体环境决定的, 文中主要研究总体环境的作用。

用人工环境控制箱模拟各种环境, 并把同一种结构试验件放入其中进行试验, 并且把它所产生的腐蚀电流进行测量、记录 and 对比。表1是金属试件在不同浓度的溶液和水中的腐蚀电流比值。

表1 不同质量分数的NaCl溶液对于水的环境因子 K

Table 1 The environmental factor K of different NaCl concentrations to water

$\omega(\text{NaCl})/\%$	0.35	0.5	3.5	7
K	1.555	1.634	8.264	10.309

影响试件腐蚀电流的因素很多。表2是同一种金属试件在不同温度和相对湿度下的腐蚀电流测量值^[5]。在表2中, 如果选择以环境(70%, 20℃)作为基准环境, 可以得到不同环境与基准环境的环境因子。

3 海洋环境因子对检查工作间隔期的影响

通过研究, 可以看到海洋环境因子对金属构件的腐蚀速率有很大的影响, 在实际应用中要针对这种影响采取适当的措施来对舰载机进行维修保障, 使舰载

表2 模拟试验件的 I 测量值

Table 2 The Current measurements of simulation test pieces

相对湿度/%	I/mA				
	20℃	25℃	30℃	35℃	40℃
70	12.027	15.963	19.954	43.509	67.092
80	10.263	19.750	29.281	53.755	78.182
90	1.264	11.211	21.199	47.741	74.247

机的安全可用度最高、经济性效益最好。

3.1 对以可用度为目标确定检查间隔期的影响

使用检查(只用于隐蔽功能故障)可保证产品的可用度, 避免多重故障的严重后果。对于有安全性影响和任务性影响的情况来说, 可通过所要求的产品的平均可用度来确定其使用检查间隔期^[6]。

假设金属产品可靠度为 $R(t)$, 检查间隔期为 T , 由于检查间隔期内不进行修理, 故产品的平均可用度 $\bar{A}$ 为:

$$\bar{A} = \frac{1}{T} \int_0^T R(t) dt \quad (7)$$

若故障时间服从指数分布, 故障率为 λ , 则由式(7)可得:

$$\bar{A} = \frac{1}{\lambda T} (1 - e^{-\lambda T}) \quad (8)$$

从式(8)可以看出, 当以可用度为目标时, $\bar{A}$ 为定值。如果在海洋环境影响下, 舰载机金属构件的海洋环境因子为 K , 即金属构件的故障率 λ 在海洋环境下增大 K , 则有:

$$\bar{A} = \frac{1}{K\lambda T_1} (1 - e^{-K\lambda T_1}) \quad (9)$$

$$T_1 = \frac{T}{K} \quad (10)$$

即在海洋环境因子影响下, 舰载机的使用检查间隔期缩短了 K 倍。

3.2 对以平均费用最小为目标确定使用检查间隔期的影响

对舰载机金属结构和部件进行检查需要消耗资源和其他成本, 因此必须考虑海洋环境因子对以平均费用最小为目标的使用间隔期的影响。

若金属结构(或部件)寿命服从指数分布 $f(t) =$

$\lambda e^{-\lambda t}$, 使用检查间隔期为 T 。每次检查发现故障隐患则立即更换; 若其运转正常, 则令其继续工作。设 C_f 和 C_d 分别表示检查 1 次和更换 1 次的平均费用, C_m 表示金属构件故障后单位时间的平均损失费用。若相对于检查间隔期 T 的检查时间和更换时间很小可忽略不计, 要求最优检查间隔期 T 能使装备经过长期运行其单位时间的平均费用 $C_i(t)$ 最小。

由图 1 可知, 当产品寿命满足关系, 相邻 2 次更换时间间隔为。此间隔期内的费用为:

$$C_d + C_f(n+1) + C_m[(n+1)T - t] \quad (11)$$

因此, 平均更换间隔时间为:

$$\bar{T}_f \sum_{n=0}^{\infty} \int_{nT}^{(n+1)T} (n+1)T \lambda e^{-\lambda t} dt = \sum_{n=0}^{\infty} T e^{-n\lambda T} = \frac{T}{1 - e^{-\lambda T}} \quad (12)$$

1 个更换间隔期时间内的平均费用为:

$$C(T) = \sum_{n=0}^{\infty} \int_{nT}^{(n+1)T} \{C_d + C_f(n+1) + C_m[(n+1)T - t]\} \lambda e^{-\lambda t} dt$$

$$= C_d + \frac{C_f}{1 - e^{-\lambda T}} + C_m \left(\frac{T}{1 - e^{-\lambda T}} - \frac{1}{\lambda} \right) \quad (13)$$

长期运行单位时间的平均费用为:

$$C_i(T) = \frac{C(T)}{\bar{T}_f} = C_m + \frac{C_f + \left(C_d - \frac{C_m}{\lambda}\right)(1 - e^{-\lambda T})}{T} \quad (14)$$

对式(14)右边的 T 求导并令其为 0, 化简得到:

$$(1 + \lambda T)e^{-\lambda T} = 1 - \frac{\lambda C_f}{C_m - \lambda C_d} \quad (15)$$

由于 $(1 + \lambda T)e^{-\lambda T} \geq 0$ 且为连续单调减函数, 当 $C_m > \lambda(C_f + C_d)$ 时, 可按式(15)用试算的方法, 求解最佳检查间隔期 T 。

特别是当很小时, 则式(15)可写为:

$$T = \sqrt{\frac{C_f}{\lambda(C_m - \lambda C_d)}} \quad (16)$$

当舰载机的金属结构和部件受到海洋环境的影响时, 设其寿命分布为 $f_1(t) = K\lambda e^{-K\lambda t}$, 设使用间隔期为 T_1 , 则根据式(16)为:

$$T_1 = \sqrt{\frac{C_f}{K\lambda(C_m - K\lambda C_d)}} \quad (17)$$

从式(17)可以看出, 以平均费用最小为目标的最

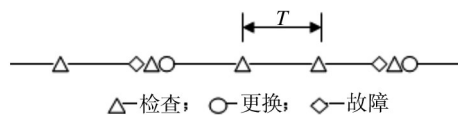


图1 检查和更换时序关系

Fig. 1 Inspection and replacement of timing relationships

佳检查间隔期 T 与寿命分布参数 λ 存在非线性关系。

4 例证

已知某金属构件寿命服从指数分布且参数 $\lambda = 0.4 \times 10^{-3}/h$, 检查 1 次和更换 1 次平均费用为 1 000 元和 20 000 元, 故障发生后单位时间的平均损失费用为 20 000 元/h, 求最佳检查间隔期 T , 使其单位时间的平均费用最小。

根据公式(17), 代入各个参数, 可得: $T=11.2$ h。

即给定金属构件在这种环境下最佳检查间隔期可取为 11.2 h。当该金属构件安装在舰载机上, 在海洋环境下进行工作时, 设海洋环境因子为 K , 则在已知的条件下, 使用检查间隔期 T 随海洋环境因子 K 变化的曲线如图 2 所示。

假设海洋环境因子 $K=2$, 则有 $T_1=7.9$ h。

在海洋环境下以平均费用最小为目标时, 该金属构件的检查间隔期应取 7.9 h, 比原来降低了 3.3 h, 降低了 29.5%。可以再次说明海洋环境对舰载机金属构件的影响之大。

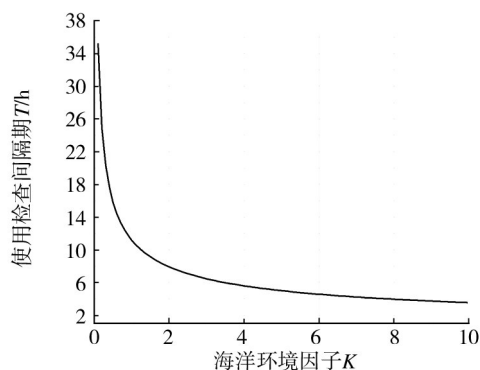


图2 使用检查间隔期 T 随海洋环境因子 K 的变化曲线

Fig. 2 The curve of checking interval T with environmental factors K

5 结语

通过分析和研究, 可以看到海洋环境对舰载机
(下转第 55 页)

4 结语

笔者以实验为基础,通过三分量水下电场测量系统,采集到了大连附近海域大量的电场数据并分析总结出其特征。

从大量的测量数据统计得出,海洋电场的幅值服从高斯分布,而其峰峰值也具有相近的分布性质,且主要集中在 $15\sim 25\ \mu\text{V/m}$ 这个区域。通过对比不同海况的海洋环境电场幅值统计特性可以说明,海水运动的剧烈程度直接影响着电场幅值的大小,海水运动越激烈,电场幅值的波动也越大,统计得出的方差也越大。在正确总结了海洋环境电场统计特性的基础上,海上探测、海上通信等许多工作得到了进一步的开展^[8-9],并逐渐走向成熟。

参考文献:

- [1] 张自力. 海洋电磁场的理论及应用研究[D]. 北京:中国地质大学,2009.
- [2] WEAVER J T. Magnetic Variations Associated with Ocean

Waves and Swell [J]. Journal of Geophysical Research, 1965, 70: 1921—1929.

- [3] WEAVER J T. Generation of Magnetic Signal by Waves and Swell, in Transient and Induced Variations in Aeromagnetic [J]. Records of Australian Geological Survey Organization, 1997, 27: 15—16.
- [4] LILLEY F E M, WHITE A, HEINSON G S. Earth's Magnetic Field: Ocean Current Contributions to Vertical Profiles in Deep Oceans [J]. Geophysical Journal International, 2001(147): 163—175.
- [5] LILLEY F E M. Sea-Surface Observations of the Magnetic Signals of Ocean Swells[J]. Geophysical Journal International, 2004(159): 565—572.
- [6] 邓明,魏文博,余平. 海底大地电磁探测的海洋试验研究[J]. 现代地质, 2002, 16(4): 443—447.
- [7] 林春生,任德奎. 海流电磁场的理论计算[J]. 海军工程大学学报, 2003, 15(4): 19—23.
- [8] 岳瑞永. 基于时谐电偶极子模型的舰船轴频电场衰减规律研究[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(10): 21—25.
- [9] 计钊. 海洋电磁环境及其水中目标特性应用的挑战[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 87—91.

(上接第50页)

金属构件的腐蚀有很大的影响。在保证舰载机的安全性的前提下,应综合考虑和权衡舰载机在海洋环境下维修保障的经济性,从而对舰载机金属构件的使用检查间隔期进行相应的调整。

参考文献:

- [1] 张春华,陈循,杨拥民. 常见寿命分布下环境因子的研究强度与环境[J]. 强度与环境, 2001, 1(4): 7—11.

- [2] 陈跃良. 海军飞机结构腐蚀控制及强度评估[M]. 北京:国防工业出版社, 2009.
- [3] 赵婉,温玉全. 可靠性评估领域中环境因子的研究进展[J]. 综述与展望 2005, 4(2): 69—71.
- [4] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- [5] 穆志韬,曾本银. 直升机结构疲劳[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [6] 甘茂治,康建设,高崎. 军用装备维修工程学[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.