

文章编号: 1000-6893(2000)02-0128-06

确定飞机日历寿命用的当量环境谱研究

张 栋

(空军第一研究所, 北京 100076)

EQUIVALENT ENVIRONMENT SPECTRUM RESEARCH OF DETERMINING CALENDAR LIFE FOR AIRCRAFT

ZHANG Dong

(The First Research Institute of Airforce, Beijing 100076, China)

摘 要: 提出了飞机使用环境由机场湿热大气环境、水介质浸泡环境和热空气老化环境三部分所组成; 根据损伤等效原则, 由法拉第定律和阿伦尼斯方程, 分别推导出一套不同环境之间的当量化关系式; 在环境实测和试验的基础上, 建立了一种适用于飞机关键部位的加速腐蚀试验环境谱, 并成功地确定了某机场的当量环境谱。

关键词: 腐蚀损伤; 当量环境谱; 加速试验

中图分类号: V215.5; V216.5 **文献标识码:** A

Abstract: Aircraft service environment consists of humid and hot atmosphere on the airport, water soaking environment and hot-air ageing environment. Based on the Faraday law and Arrhenius equation, a set of universal formulas of the equivalent environment is developed. According to the corrosion damage equivalent principle, the relative expression of an equivalent accelerated relation between the accelerated corrosion environment spectrum and ground environment spectrum is determined. Based on tests and survey, an accelerated corrosion test environment spectrum used for the critical area of aircraft structures is presented. Equivalent environment spectra of accelerating corrosion test for components and simulation structures are given.

Key words: corrosion damage, equivalent environment spectrum, accelerated test.

飞机机体在服役条件下的环境行为和失效机制引起人们的高度重视。环境的多样性和复杂性, 使材料的性能也发生相关的响应, 在服役环境下飞机机体腐蚀疲劳寿命和日历寿命研究已经提到日程, 而首先要解决的关键技术问题是服役环境的当量化, 以及加速腐蚀试验环境谱的研究^[1~3]。应当指出, 用途不同则当量环境谱也不同, 本文着重研究确定飞机日历寿命所用当量环境谱的技术途径和方法, 推导出一套当量化公式, 并编制了当量环境谱, 成功地应用于确定 HX 型飞机日历寿命的加速模拟腐蚀试验, 取得了满意的结果。

1 飞机服役环境的组成

1.1 飞机服役环境近似等于飞机停放环境

众所周知, 飞机服役环境由飞行环境和停放

环境所组成。民用客机可以达到 1/3 时间飞行, 2/3 时间停放。而军机则 1/30 时间飞行, 29/30 时间停放。实际上我国军机使用率较低, 多数飞机 98% 以上的时间处于停放状态。

对于飞机机体的日历寿命而言, 一般情况下飞行空域环境所造成的腐蚀损伤不会大于停放环境所造成的腐蚀损伤。因此, 在研究飞机服役环境时, 只需要研究停放环境, 即飞机服役环境近似等于飞机停放环境。

1.2 飞机停放环境在空间范围的 3 个层次

(1) 飞机所在机场的大环境 一般来讲, 机场气象台都有历年来机场大环境的详实气象数据资料, 以年为周期的机场大环境是有规律性的, 特别是温度、湿度、雨量的变化呈现季节性。

(2) 飞机停放处的局部环境 由于停放地点、停放条件的不同, 同一时刻飞机停放的局部环境与机场大环境有所不同, 但局部环境在很大程度上取决于大环境。

(3) 飞机机体结构具体小环境 例如油箱舱、货舱、座舱、弹舱、电瓶舱等机体内部具体环境, 不仅与机场大环境不同, 而且与飞机停放处的局部环境也不同。正是飞机结构具体环境决定着飞机结构的日历寿命。可惜, 在涉及飞机机体具体小环境方面的研究工作很少, 可供分析、应用的环境数据资料奇缺。

1.3 飞机停放环境的三大组成

不论是机场大环境、停放处局部环境还是机体内部具体小环境, 就其对飞机机体材料的腐蚀(或老化)而言可以归纳为 3 种类型:

(1) 湿热大气腐蚀环境 这是飞机服役环境中对机体腐蚀损伤持久起作用并且影响较大的一种环境。温度高、湿度大、大气污染严重, 则腐蚀越严重。一般达到空气中的临界(例如 $HR > 65\%$) 相对湿度时, 金属腐蚀速度突然上升^[4], 而 $HR \leq 50\% \sim 70\%$ 时, 则不发生腐蚀。

(2) 介质浸泡腐蚀环境 就飞机机体内部各种结构舱的具体小环境来讲, 进入的雨水、雪水、露水、以及温差变化在机内形成的冷凝水、人体排出的水份等, 往往使内部结构的某些死角长期处于介质浸泡环境, 而水介质是最常见的也是最主要的介质。在一定的介质浸泡环境下, 温度越高、腐蚀速度越快。

(3) 干燥热空气老化环境 这种环境对金属基体仅引起很轻微的腐蚀, 但对表面涂层的老化却有很大影响, 也就是说对涂层的日历有效期有很大影响。氧和臭氧的存在是涂层老化的重要

原因。太阳辐射, 尤其是 3800~ 的紫外线对涂层老化有重要影响。幸好决定飞机机体日历寿命的主要承力结构一般都不直接受紫外线辐射, 所以可不加考虑。

综上所述, 飞机服役环境, 最终可以分解为由停放时的湿热大气腐蚀环境、介质浸泡腐蚀环境和热空气老化环境 3 部分所组成。因此, 当量环境谱理应复盖这 3 种环境, 而环境的当量化也应针对这 3 种环境分别加以当量化。

2 环境实测和大小环境的关系

为了探讨机场大环境、停机坪(局部)环境、机体内部小环境 3 种环境的变化规律和相互关系, 需要长期监测这 3 种环境, 积累大量原始数据。

机场环境一般有气象站常年实测的历史资料, 包括逐日指定时间的气温、相对湿度、日降水量及降水时数、每月雾日数及时数等。通过计算, 可以得出该机场若干年在各温度下、不同湿度范围的小时数。表 1 列出了 $\times\times$ 机场 5 年内(1988 年 1 月到 1992 年 12 月)各温、湿度下的小时数。

不同停机坪, 特别是不同飞机机体内部小环境的温度谱、湿度谱等实测数据资料非常少, 对许多机种来说几乎是空白。重点选择 $\times\times$ 机场(该机场停放飞机的腐蚀状态十分严重), 对 HX 型飞机的停机坪、机翼油箱舱和机场 3 种环境采用智能型温度湿度记录仪实施 24h 监测。

先后选择了 6 架飞机, 分别在冬、夏两个典型季节进行了实测, 其典型结果如图 1 和图 2 所示, 大体上有如下特点。

表 1 $\times\times$ 机场 5 年各温度下, 不同湿度范围的小时数

湿度 小时数 温度 / °C	[1, 10]	[10, 20]	[20, 30]	[30, 40]	[40, 50]	[50, 60]	[60, 70]	[70, 80]	[80, 90]	[90, 100]
[- 10, - 5]	0	0	0	3	6	8	7	8	8	7
[- 5, 0]	0	0	3	18	24	24	45	118	173	140
[0, 5]	5	1	36	104	144	281	475	864	1616	1526
[5, 10]	5	5	47	186	359	581	929	1579	2296	1549
[10, 15]	0	17	108	265	379	621	837	1009	1390	1234
[15, 20]	0	8	105	333	452	601	875	1143	1306	1395
[20, 25]	0	1	77	232	388	624	936	1649	2367	2213
[25, 30]	0	0	15	63	185	434	968	2038	2374	1073
[30, 35]	0	0	6	15	79	451	1148	768	94	1
[35, 40]	0	0	0	2	88	255	46	0	0	0
[40, 45]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

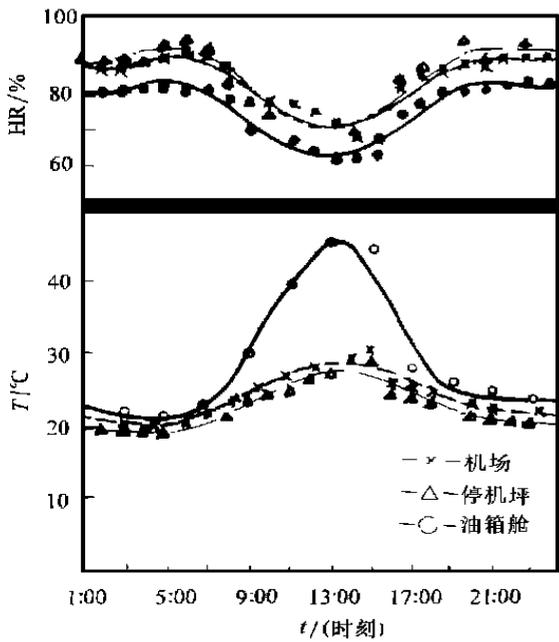


图1 夏天 T-t 和 HR-t 曲线

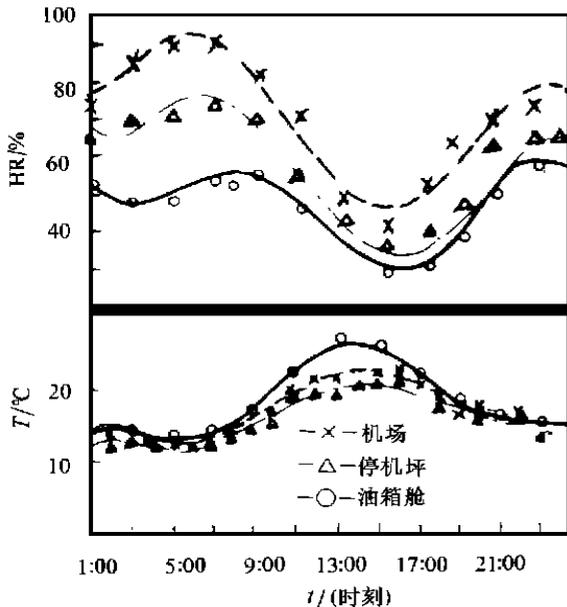


图2 冬天 T-t 和 HR-t 曲线

2.1 温度随时间的变化曲线(T-t 曲线)

(1) 机场大气温度、停机坪温度和油箱舱温度随时间变化的3条曲线波形相同,都以日为循环周期。其中机场大气温度和停机坪温度变化非常一致,温度的绝对值也非常接近。

(2) 3条曲线的位置一般是油箱舱温度曲线在上,机场温度曲线居中,停机坪温度曲线在下。即在同一时刻: $T_{\text{油箱舱}} > T_{\text{机场}} > T_{\text{停机坪}}$ 。

(3) 3种环境温度差别大的时区主要是在一日内的高温区间,即上午9:00至下午17:00。夏季温差大,最大温差可达15℃左右,即油箱

舱的温度可比停机坪大气温度高15℃左右。从总体上来看,油箱舱的日温度平均比机场气温高2℃左右。

2.2 湿度随时间的变化曲线(HR-t 曲线)

(1) 3条曲线的波形也大体相同,都以日为循环周期。

(2) 3条曲线的位置,一般是机场湿度曲线在上,油箱舱湿度曲线在下。即在同一时刻: $HR_{\text{机场}} > HR_{\text{油箱舱}}$

(3) 3种环境湿度差别大的时区主要在冬季的早、晚低温段。

2.3 3种环境总的特征

(1) 温度、湿度均以日为周期循环变化。

(2) 在一日之内,温度上升时,湿度下降。早、晚时3种环境的温度低、温差小,而湿度高、湿差大;中午时3种环境的温度高、温差大,而湿度低、湿差小。

(3) 冬季温度低,温差小而湿差大,夏季温度高、温差大而湿差小,以年为周期反映出季节的特征。

环境实测表明,飞机机体结构内部小环境的温度、湿度变化是有规律的。非常重要的一个结论是:无论冬夏,油箱舱一日之内的温度和湿度变化呈相反趋势。尽管油箱舱的温度在中午时明显升高,但湿度却明显下降,就内部结构的腐蚀而言,两者的作用在一定程度上相互抵消。因此,在目前小环境数据严重不足的情况下,在工程上可以用场机大环境谱来近似替代机内小环境谱。

另外,对机场大气和飞机油箱舱积水污染物进行了一些实测,结果表明,对同一个机场来说,大气中二氧化硫和氮氧化物浓度在一年不同季节变化较大,但雨水中的硫酸根和氯离子含量却变化不大。

3 环境当量化的依据

飞机的日历总寿命一般为20~30年,甚至更长,因此用真实的服役环境谱来做腐蚀试验显然行不通。当量化的目的就是要建立当量环境谱来替代服役环境谱,从而可以开展对典型结构件的加速腐蚀试验来研究机体的日历寿命,有效地缩短试验周期。

环境当量化的基本原则是结构腐蚀损伤等效原则。不仅腐蚀损伤的类型和模式相同,而且损伤

量也相等。

对飞机机体结构日历寿命有重大影响的腐蚀, 主要是电化学腐蚀, 电化学反应中所伴随的电荷转移和传递与反应物质的变化量之间存在着严格的等当关系, 服从法拉第定律

$$Q = \frac{1}{F} \int_0^t I_c(t) dt \quad (1)$$

式中: Q 为金属的腐蚀量; I_c 为腐蚀电流; t 为腐蚀时间; F 为法拉第常数, 96494 库仑/克当量。

选择腐蚀电流 I_c 来度量腐蚀量, 就可以比较准确地建立起不同环境条件之间的当量关系。

对于表面防腐涂层系统, 在一定的温度范围内, 其质量变化率随温度提高呈指数上升的规律, 基本上符合阿伦尼斯方程

$$t = Ae^{SE/KT} \quad (2)$$

式中: t 为反应的时间; A 为常数; SE 为激活能; k 为波尔茨曼常数; T 为绝对温度

由于式(2)是非线性的, 确定 A , SE 需要解非线性方程组, 不仅工作量大, 而且不实用。

从环境当量化的需求出发, 主要依据法拉第定律来建立不同环境之间的当量关系。

4 环境当量化的方法和公式

4.1 湿热大气环境的当量化

在式(1)中的 I_c (腐蚀电流) 是环境条件即腐蚀介质及浓度、温度、湿度的函数, 当环境条件不变时, I_c 也不变, 作为常数。因此, 由式(1)可得

$$Q_p = \frac{1}{F} \int_0^{t_p} I_{cp}(t) dt = \frac{1}{F} I_{cp} t_p \quad (3)$$

$$Q_i = \frac{1}{F} \int_0^{t_i} I_{ci}(t) dt = \frac{1}{F} I_{ci} t_i \quad (4)$$

式中: Q_p , I_{cp} , t_p 为指定环境条件下的金属腐蚀量、腐蚀电流、腐蚀时间; Q_i , I_{ci} , t_i 为第 i 种环境条件下的金属腐蚀量、腐蚀电流、腐蚀时间。

根据腐蚀损伤等效原则, 即 $Q_p = Q_i$

$$\text{则 } I_{cp} t_p = I_{ci} t_i \quad (5)$$

$$\text{或 } \frac{t_i}{t_p} = \frac{I_{cp}}{I_{ci}} = A \quad (6)$$

式中: A 为两种环境条件之间的当量折算系数, 它反映了两种环境条件下, 腐蚀反应速度之比。

只要在不同环境条件下的电化学腐蚀过程中测量出各自的腐蚀电流 I_{ci} , 就可以求出它们之间相应的当量折算系数 A 。通过材料腐蚀当量试验系统的试验, 给出铝合金在湿热环境条件下的温度-湿度-当量折算系数结果, 如图 3 和图 4 所

示。

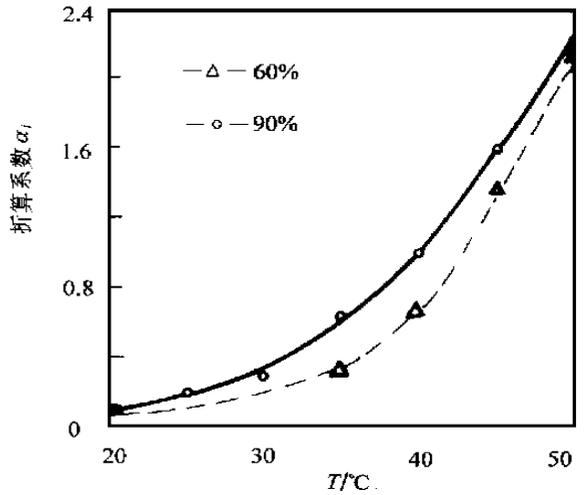


图 3 T-A 曲线

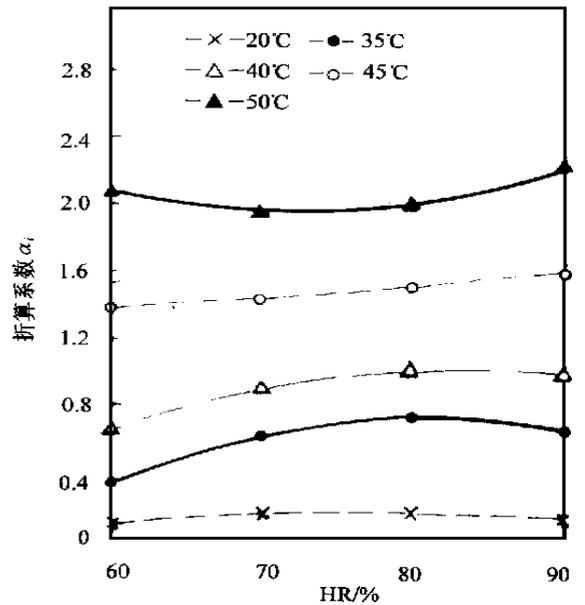


图 4 HR-A 曲线

由图 3 可知, 在一定的湿度下, 温度由 20°C 升至 50°C, A 可增加 12~20 倍左右; 在一定的温度下, 湿度由 60% 到 90% 之间变化, A 增加不会超过 2 倍。由此可见, 温度起主导作用。但 A 无论对温度或对湿度, 大多不是线性关系。

具体折算办法是: 由表或图分别查得 T_i , HR_i 对应的当量折算系数 A 和 T_p , HR_p 对应的当量折算系数 A_p , 则当量化关系式为

$$t_{pi} = t_i A \Big/ A_p \quad (7)$$

进而 $t_p = t_{p1} + t_{p2} + \dots + t_{pi} + \dots + t_{pN} =$

$$\sum_{i=1}^N t_i \frac{A}{A_p} = \frac{1}{A_p} \sum_{i=1}^N t_i A \quad (8)$$

式中: t_p 为在指定温度、指定湿度下加速试验总的小时数; N 为服役环境中不同温度和不同湿度的

组合数。

4.2 介质浸泡环境的当量化

严格地讲,对不同材料,放在不同介质中浸泡,测定不同温度下的腐蚀电流,那末根据法拉第定律,同样可以建立介质-温度-当量折算系数(B)曲线。也同样可以得到类似于式(7)和式(8)的当量化关系式

$$t_{wi} = t_i B_i \sqrt{B_p} \quad (9)$$

$$t_w = \frac{1}{B_p} \sum_{i=1}^N t_i B_i \quad (10)$$

式中: t_{wi} 为在指定介质和指定温度下加速试验的小时数; t_i 为在某种服役介质和某一温度下停放浸泡的小时数; B_i 为由介质-温度-当量折算系数曲线(或表)查得的某一当量折算系数; B_p 为与指定介质和指定温度对应的当量折算系数; t_w 为在指定介质和指定温度下加速浸泡试验的总的小时数。

应当指出,至今还缺乏有关介质-温度-当量折算系数方面的基础性原始数据和资料,有待不断开拓。但一般认为,雨水的温度与气温相差不大,在下雨期间大气中相对湿度能达到 90% ~ 93% 左右^[4]。在表 1 中最右一列的小时数,其中主要是下雨时形成的高湿度。

雨水是飞机机体内部结构浸泡介质最主要的来源,其次是冷凝水,由于冷凝水量难以实测,又与原来所进雨水无法区分,并且下雨天的高湿度又是冷凝水的重要成因。所以,作为一种近似,主要考虑降雨小时数,仍然可以利用温度-湿度-当量折算系数表或曲线进行当量化处理

$$t_{wi} = t_r A_i \quad (11)$$

式中: t_r 为在某一温度下降雨的小时数。

$$t_w = \frac{1}{A_p} \sum_{i=1}^N t_r A_i \quad (12)$$

更简单的方法是

$$t_w = t_p t_m \sqrt{(365 \times 24)} \quad (13)$$

式中: t_m 为年均降雨小时数。

4.3 干燥热空气环境的当量化

在干燥大气环境下仅需考虑涂层系统的老化问题,这时不可能再依据法拉第定律来进行当量化处理,而要根据阿伦尼斯方程来当量化。当环境类型和涂层系统一定时,在某一温度 T_i 条件下,

该涂层系统的反应时间 t_{Hi}

$$t_{Hi} = A e^{SE/kT_i} \quad (14)$$

那末,在指定温度 T_p 条件下,加速老化试验的反应时间 t_{Hp}

$$t_{Hp} = A e^{SE/kT_p} \quad (15)$$

由式(14)和式(15)可得:

$$t_{Hp} = t_{Hi} e^{SE/k(1/T_p - 1/T_i)} \quad (16)$$

根据式(16)当量化关系式,就可以把服役环境中在不同温度 T_i 条件下,涂层系统所停放经历的不同时间 t_{Hi} ,逐一当量化到指定的加速试验温度 T_p 条件下所需的老化反应时间 t_{Hp} 。于是加速老化试验的总时间 t_H

$$t_H = \sum_{i=1}^N t_{Hi} e^{SE/k(1/T_p - 1/T_i)} \quad (17)$$

这里首先要通过试验来获得不同涂层系统在服役环境下的反应激活能 SE ,方能进行当量化处理。经验证明^[4],化学反应的速度都按温度每升高 10°C ,增加 1 倍的规律而加速。据此可以得到下式

$$t_{Hp} = \frac{t_{Hi}}{2^{(T_p - T_i)/10}} \quad (18)$$

$$t_H = \sum_{i=1}^N t_{Hi} / 2^{(T_p - T_i)/10} \quad (19)$$

显然,这是一种简单的经验关系式,但在工程上却相当实用。

综上所述,服役环境当量化的总时间 t_y

$$t_y = t_p + t_w + t_H \quad (20)$$

5 算例

现以表 1 实测处理的 $\times\times$ 机场的原始数据来进行当量化处理。

(1) 湿热大气环境的当量化估算 现指定在温度 50°C ,相对湿度 80% 的条件下做加速试验,由表或曲线查得, $A = 2.0018$ 。

在表 1 中起作用的是温度 $\geq 20^\circ\text{C}$,湿度 $\geq 60\%$ 的小时数,即表 1 中右下部分。根据式(7)和式(8),将估算结果综合列于表 2。

表 2 当量化到 50, 80% 湿度下的折合时间

T_i	HR _i	t_i	A	t_{pi}
20	60%	936	0.10424	48.74
20	70%	1649	0.16380	135.1
50	80%	0	2.0018	0
50	90%	0	2.22143	0
5年总的折合时间/h				1353.5

每年的总折合时间

$$t_p = 1353.5 \div 5 \div 24 = 11.3(\text{d})$$

估算结果: 就湿热大气环境而言, 在××机场平均停放一年, 相当于在 50℃, 80% 大气条件下加速试验 11.3d。

(2) 介质浸泡环境的当量化估算 现指定在 50℃, 5%NaCl 水溶液条件下做加速试验。由于缺乏降雨时数和相应气温的匹配数据, 因此只能用简化的方法, 已知××机场 1988~1992 年之间的年均降雨小时数为 1210h(相当于 50.4d), 而降雨时的平均温度约 20℃。这样, 可以利用式(11)进行估算

$$t_w = t_r \frac{A}{A_p} = 1210 \times \frac{0.11045}{2.22143} = 2.54(\text{d})$$

或者利用式(13)进行估算

$$t_w = t_p \frac{t_m}{365 \times 24} = 11.3 \times \frac{1210}{365 \times 24} = 1.55(\text{d})$$

估算结果: 就介质浸泡环境而言, 在××机场平均停放一年, 相当于在 50℃, 5%NaCl 水溶液条件下加速试验 1.55~2.54d。

(3) 干燥热空气老化环境的当量化估算 现指定在 100℃热空气条件下做加速老化试验。××机场 1988 - 1992 年 5 年之间年均气温 17.3℃, 考虑到油箱舱温度平均比机场气温高 2℃左右, 所以取 $T_i = 20^\circ\text{C}$ 。利用式(18)估算如下

$$t_{Hp} = \frac{t_{Hi}}{2^{(T_p - T_i)/10}} = \frac{365(\text{d})}{2^{(100 - 20)/10}} = 1.42(\text{d})$$

(上接 127 页)

递归神经网络自适应滤波器在机动目标跟踪中的应用= Adaptive recurrent tracking-filter for maneuvering target/ 刘勇(哈尔滨工业大学), 沈毅, 胡恒章. - 1999, 12(3). - 164~170

针对目标跟踪领域中杂波干扰和目标机动情况下的目标跟踪问题, 应用递归神经网络具有的逼近任意 L_2 中间的非线性函数, 以及能够自适应调节自身记忆深度以适应系统结构和参数信息变化的能力, 提出了递归神经网络最优自适应非线性跟踪滤波器, 分析证明了其最优滤波特性。最后, 对具有不同运动情形的机动目标进行仿真, 并与多模型跟踪算法相比较; 结果表明递归神经网络跟踪滤波器具有优良性能, 而且它不需要预先假设机动目标的运动模型, 以及已知系统噪声和量测噪声的协方差矩阵。

关键词 机动目标, 递归神经网络, 自适应滤波

图象合成中的 DT 三角形化与稠密匹配= Adaptive recurrent neural networks tracking-filter for maneuvering target/ 沈沛意(西安电子科技大学), 王伟, 吴成柯. - 1999, 12(3). - 171~175

提出了基于 DT 三角形化的图象合成新方法。首先对

估算结果: 就热空气老化环境而言, 在××机场平均停放 1 年, 相当于在 100℃热空气条件下加速试验 1.42d。

综上所述, 在 50℃, 80% 相对湿度的湿热大气条件下腐蚀 11.3d, 加上在 50℃, 5%NaCl 水溶液条件下浸泡 1.55~2.54d, 再加上在 100℃热空气条件下老化 1.42d, 就相当于在××机场服役环境停放 1 年。这就是确定××机场 HX 型飞机日历寿命所用的以停放年为周期的当量环境谱, 当然根据情况, 也可用半年或月为周期来编谱, 以增加 3 种环境的交替频率。采用这种当量环境谱, 成功地完成了 HX 型飞机外翼长桁的加速腐蚀试验, 再现了剥蚀故障, 并测得涂层的日历有效期和基体腐蚀速率。

参 考 文 献

- [1] 周希沅. 飞机结构的当量环境谱与加速试验谱[J]. 航空学报, 1996, 17(5): 613~616.
- [2] 陈群志, 刘文, 徐晓飞, 等. 飞机结构典型环境腐蚀当量关系研究[J]. 航空学报, 1998, 19(4): 414~418.
- [3] 董登科, 王俊扬. 关于军用飞机服役日历年限评定用的当量环境谱[J]. 航空学报, 1998, 19(4): 414~418.
- [5] 李金桂, 赵闰彦. 腐蚀和腐蚀控制手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988. 28~29. 335.

作者简介: 详见本刊 1999 年第 6 期 561 页

两幅参考图象做 DT 三角形分割。然后利用对极几何约束做图象点的匹配。最后根据三线性约束下的像素转移方法构建第三个新的视角图象。由于利用了 DT 三角形化技术, 所以本方法克服了传统的匹配方法中的计算费用大的缺点, 不仅节省了计算时间, 而且改善了图象合成的质量。本文提出的方法可直接应用在视频编码、图象压缩和虚拟现实等领域。

关键词 图象合成, DT 三角形化, 图象匹配, 像素转移

B 样条曲面的小波光顺法= Wavelet-based fairing of B-spline surfaces/ 孙延奎(北京航空航天大学), 朱心雄. - 1999, 12(3). - 176~182

研究了应用小波分解技术光顺 B 样条曲面的方法即小波光顺法。详细地描述了准均匀 B 样条曲面的小波分解与重构。介绍了利用准均匀 B 样条曲面逼近任意 B 样条曲面算法, 提出了一种基于小波的曲面光顺误差控制方法, 通过实例验证了所提出算法的可行性。实践表明, 当 B 样条曲面的控制顶点超过 1000 时, 小波光顺法优于基于能量的光顺法。需要进一步研究的问题是确定逼近误差随小波分解变化的定量关系。

关键词 多分辨率表示, 小波分解, 逼近误差, 小波光顺法