

文章编号:1000-6893(2000)03-0251-03

## 飞机结构缺陷漏检概率评估与控制技术

刘登第, 傅惠民

(北京航空航天大学 固体所, 北京 100083)

## CONTROLLING METHOD FOR AIRCRAFT FLAW PROBABILITY OF MISSING

LIU Deng-di, FU Hui-min

(Institute of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘要:**提出了一种飞机结构缺陷漏检概率评估与控制技术,利用该技术可以有效地提高单机乃至机群中缺陷(裂纹)检出概率(PDI),并可以对缺陷(裂纹)的漏检概率进行准确地评估和控制,使飞机因裂纹漏检而造成事故的可能性降至最低程度,从而确保飞机的安全飞行。

**关键词:**无损检测;飞机结构;可靠性;控制

**中图分类号:** V216.3; V215.7 **文献标识码:** A

**Abstract:** A method for evaluating and controlling the probability of missed flaws in aircraft structure is presented in this paper. The method can control the largest size of the flaws missed at nondestructive testing with high probability of flaw detection and confidence level. This method can also raise the flaw detection probability and avoid flight accidents caused by the missed flaws in aircraft structure. It is simple and convenient for application in engineering.

**Key words:** nondestructive testing; aircraft structure; reliability; controlling

裂纹(缺陷)漏检是飞机发生事故的主要原因之一,有关调查资料表明,因结构材料失效而造成的重大事故中,有80%以上是裂纹(缺陷)漏检引起的<sup>[1-3]</sup>。近几年来,尽管无损检测技术有了很大发展,但是不同检测人员对同一裂纹进行检测时,得到的结果仍然存在较大差异,并不能百分之百地检测出结构材料中大于规定尺寸的裂纹。在实际问题中,一个最小能检测到零点几毫米,甚至几个微米裂纹的无损检测设备,常常连几个毫米,甚至十几个毫米的裂纹也会漏检<sup>[4]</sup>。因此,飞机经无损探伤后,如何准确地评估飞机中裂纹(缺陷)的漏检情况,并将飞机乃至机群中大于某一规定尺寸的裂纹(缺陷)漏检概率控制在预先指定的范围内,是确保飞行安全的关键所在。美国波音公司曾提出一种损伤容限比(DTR)方法<sup>[5]</sup>,但是DTR方法的误差较大,而且实际检测时,需要耗费大量的人力、物力和时间,很少使用。为了解决这一问题,本文建立了结构缺陷漏检概率评估和控制技术,该技术可以有效地提高外场实际飞机结构中裂纹(缺陷)的检出概率,保证无损检测质量,使飞机和发动机因漏检而带裂纹(缺陷)飞行的可能性降至最低程度。该技术不但具有很高的精确度,而

且简单方便,易于工程实施和应用,远远优于DTR方法。

## 1 评估飞机中缺陷漏检概率的方法

(1) 评估危险部位缺陷漏检概率的方法 当以某一危险部位为研究对象时,设 $P_{ij}$ 是第 $i$ 个危险部位利用第 $j$ 种检测设备检测一次时大于规定尺寸的裂纹漏检概率,那么检测 $K$ 次时其漏检概率 $P_{ij}^{(K)}$ 为

$$P_{ij}^{(K)} = P_{ij}^K \quad (1)$$

若用 $q$ 种不同的检测仪器分别进行 $K$ 次独立检测时,那么第 $i$ 个危险部位的漏检概率 $P_{ii}^{(K)}$ 为

$$P_{ii}^{(K)} = \prod_{j=1}^q P_{ij}^K \quad (2)$$

式中: $K$ 是第 $j$ 种检测仪器的独立检测次数; $j=1, 2, \dots, q$ ;  $P_{ij}$ 可由文献[1]提供的方法求得。当规定的裂纹尺寸取 $a_{\text{NDT}}$ 时,根据损伤容限设计原则,可取 $P_{ij} = 10^{-3}$ ,此时式(1)成为

$$P_{ii}^{(K)} = \left( \frac{1}{10} \right)^K \quad (3)$$

式(2)成为

$$P_{ii}^{(K)} = \left( \frac{1}{10} \right)^{\sum_{j=1}^q K_j} \quad (4)$$

(2) 评估单机缺陷漏检概率的方法 设某一飞机上共有 $n$ 个危险部位,对应某一检查级别,对

其中  $m$  个危险部位进行了无损探伤,那么这  $m$  个危险部位中大于某一规定尺寸的裂纹漏检概率  $P_M^{(1)}$  由下式计算

$$P_M^{(1)} = \sum_{i=1}^m P_{M_i}^{(1)} = \sum_{i=1}^m P_{M_i}^{(1)} P_{M_i}^{(1)} + \sum_{i=1}^m P_{M_i}^{(1)} P_{M_i}^{(1)} P_{M_i}^{(1)} + \dots + (-1)^{m-1} \prod_{i=1}^m P_{M_i}^{(1)} \quad (7)$$

式中:  $P_{M_1}^{(1)}, P_{M_2}^{(1)}, P_{M_3}^{(1)}, \dots$ , 可分别由式(1)~式(4)给出。将式(3)代入式(5)可得每个危险部位都检测  $K$  次时的裂纹漏检概率为

$$P_M^{(1)} = C_m \left( \frac{1}{10} \right)^K = C_m \left( \frac{1}{10} \right)^{2K} + C_m \left( \frac{1}{10} \right)^{3K} + \dots + (-1)^m C_m \left( \frac{1}{10} \right)^{mK} \quad (6)$$

当  $m=n$  时,式(5)和式(6)将给出该飞机中大于某一规定尺寸的裂纹漏检概率。

(3)评估机群缺陷漏检概率的方法 当对某一由  $W$  架飞机组成的机群进行全部定期检查时,则该机群经无损检测后缺陷的漏检概率  $P_M^{(1)}$  为

$$P_M^{(1)} = \sum_{i=1}^W P_{M_i}^{(1)} = \sum_{i=1}^W P_{M_i}^{(1)} P_{M_i}^{(1)} + \sum_{i=1}^W P_{M_i}^{(1)} P_{M_i}^{(1)} P_{M_i}^{(1)} + \dots + (-1)^{W-1} \prod_{i=1}^W P_{M_i}^{(1)} \quad (7)$$

式中:  $P_{M_1}^{(1)}, P_{M_2}^{(1)}, P_{M_3}^{(1)}$  可由式(5)或(6)给出。

## 2 飞机缺陷漏检概率控制技术

从式(1)和式(2)可以看出,通过增加同一检测设备的独立检测次数或者通过增加不同检测设备不同组合<sup>[5]</sup>,可以明显地减少缺陷的漏检概率。因此,检测人员可以通过控制独立检测次数和检测设备不同组合来达到控制缺陷漏检概率的目的。

(1)结构危险部位缺陷漏检概率控制技术 根据式(1)、式(2)可知,对于预先规定的漏检概率  $\hat{P}$ ,利用第  $j$  种检测设备,使第  $i$  个结构危险部位中大于规定尺寸的缺陷漏检概率  $P_{M_i}^{(1)}$  不超过  $\hat{P}$  的独立检测次数  $K$  可由下式计算

$$K = \ln \hat{P} / \ln P_{M_i} \quad (8)$$

若用  $q$  种不同的检测仪器分别进行独立检测时,所需要的数据融合次数  $K_j, j=1, 2, \dots, q$ , 可由下式计算

$$\ln \hat{P} = \sum_{j=1}^q K_j \ln P_{M_i} \quad (9)$$

其中满足条件的  $K_1, K_2, \dots, K_q$  有多种不同的组合,可根据具体情况取其中之一。若当  $K_1 = K_2 = \dots = K_q = K$  时,上式变为

$$K = \ln \hat{P} / \sum_{j=1}^q \ln P_{M_i} \quad (10)$$

当规定的裂纹尺寸取  $a_{\text{cor}}$  时,根据损伤容限设计原则,可取  $P_{M_i} = 10^{-6}$ , 此时式(10)成为

$$K = - \frac{1}{q} \lg \hat{P} \quad (11)$$

当用一种检测仪器进行探伤时,需要的独立检测次数  $K$  由下式计算

$$K = - \lg \hat{P} \quad (12)$$

如果计算出的  $K$  值不为整数时,可取大于它的最小整数为最佳独立检测次数。

(2)单机结构缺陷漏检概率控制技术 设一架飞机中  $n$  个危险部位,欲使该机结构中大于规定尺寸的缺陷漏检概率小于预先给定的  $P$ , 则可由下式求得每个危险部位应控制的缺陷漏检概率  $P_i$

$$P_i = \omega_i x \quad i=1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式中:  $x$  由下式计算

$$P = \sum_{i=1}^n \omega_i x = \sum_{i=1}^n \omega_i \omega_i x + \sum_{i=1}^n \omega_i \omega_i \omega_i x^2 + \dots + (-1)^{n-1} \prod_{i=1}^n \omega_i x^n \quad (14)$$

式中:  $\omega_i$  是第  $i$  个危险部位的重要度,满足条件  $0 \leq \omega_i \leq 1, \sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ ,  $\omega_i$  可根据该危险部位在飞机中的重要程度来确定,当  $\omega_i = 1/n$  时,  $i=1, 2, \dots, n$ , 则表示各部位的重要程度相同,式(14)变为

$$P = \frac{1}{n} C_n x = \frac{1}{n^2} C_n x^2 + \frac{1}{n^3} C_n x^3 + \dots + (-1)^{n-1} \frac{1}{n^n} C_n x^n \quad (15)$$

这里  $x$  可以通过迭代方法求解,解出  $x$  后代入式(13)即可得到  $P_i$ , 然后通过上面(1)方法即可使每个结构危险部位中的缺陷漏检概率低于  $P_i$ , 从而将该架飞机缺陷的漏检概率控制在预先指定的  $P$  以下。

(3)机群结构缺陷漏检概率控制技术 欲使一个由  $W$  架飞机组成的机群中大于规定尺寸的缺陷漏检概率小于预先给定的  $P$ , 则首先将  $P$  按每架飞机的重要程度进行分配,求得每架飞机应控制的缺陷漏检概率  $P_i$

$$P_i = \omega_i y \quad i=1, 2, \dots, W \quad (16)$$

式中:  $y$  由下式计算

$$P = \sum_{i=1}^W \omega_i y = \sum_{i=1}^W \omega_i \omega_i y + \sum_{i=1}^W \omega_i \omega_i \omega_i y^2 + \dots + (-1)^{W-1} \prod_{i=1}^W \omega_i y^W \quad (17)$$

式中:  $\omega_i$  是第  $i$  架飞机的重要度, 满足条件  $0 \leq \omega_i \leq 1$ ,  $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ 。当  $\omega_i = 1/n, i = 1, 2, \dots, n$ , 则表示每架飞机的重要程度都相同, 那么式(17)变为

$$P = \frac{1}{W} C_{11}^0 y + \frac{1}{W} C_{12}^0 y + \frac{1}{W} C_{13}^0 y + \dots + (-1)^{n-1} \frac{1}{W} C_{1n}^0 y \quad (18)$$

解出  $y$  后得到  $P$ , 然后采用前述(2)方法即可将每架飞机缺陷的漏检概率控制在  $P$  以下, 从而保证了该机群中大于规定尺寸的缺陷的漏检概率低于  $P$ 。

### 参 考 文 献

- [1] Burns A P, Hovey P W. Flaw detection criteria[R]. AFWAL-TR-84-1022, 1984.
- [2] Provan J W. Probability fracture mechanics and reliability

R. Martinus Nijhoff Publishers, 1987.

- [3] 傅惠民, 钱若力. 无损检测可靠性与寿命控制方法[J]. 航空动力学报, 1994, 9(3): 227~228.
- [4] [日] 上山中夫著. 结构可靠性[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [5] 刘登第, 傅惠民, 等. 一种新的数据融合方法[J]. 中国安全科学学报, 1998, 8(6): 1~4.



刘登第 男, 1966 年生, 空军第一航空学院讲师, 1996 年硕士毕业于西南交通大学人机与环境工程专业, 现为北京航空航天大学博士研究生, 师从傅惠民教授, 被评为北航优秀博士生, IET 奖学金获得者, 研究兴趣: 飞机的可靠性与安全性, 无损检测, 飞机的寿命控制方法。在国内外期刊上发表论文 10 余篇, 联系地址: 北京航空航天大学 7-61 信箱, 100083, 联系电话: 82325712

傅惠民 详见本刊 2000 年第 21 卷第 2 期 158 页。

## 第七次全国振动理论及应用学术会议在佛山举行

由中国航空学会和中国振动工程学会、中国机械工程学会、中国力学学会、中国宇航学会联合主办, 上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室和佛山科学技术学院联合承办的“第七次全国振动理论及其应用学术会议”于 1999 年 12 月 8~12 日在佛山科学技术学院成功举行。出席会议的代表共有 119 人。

本次学术会议的大会开幕式由中国振动工程学会副理事长胡海岩教授主持, 佛山科学技术学院的秦忆院长首先向全体参会代表致欢迎词; 之后, 中国振动工程学会名誉理事长黄文虎院士, 新任理事长闻邦椿院士分别讲话。他们就振动理论及其应用领域的研究现状及成果、发展方向和前景、以及今后的任务作了简要而准确的分析, 使代表们深受启迪; 上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室主任陈进教授和佛山科学技术学院副院长孟光教授分别代表本次大会秘书组和会务组介绍了学术会议的筹备、组织过程, 学术论文征集、录用、编辑、出版和学术活动安排, 以及会务工作等各方面情况。

大会开幕式后, 举行了本次学术会议的大会特邀报告会。它们是: 黄文虎院士的“非线性转子动力学的研究现状与发展趋势”, 闻邦椿院士的“波及波能利用技术的近期发展及展望”, 胡海岩教授的“对振动学及其发展的美学思考”和陈进教授的“现代信号处理技术在机械故障诊断中的发展前景探讨”。他们的报告引起了代表们的共鸣, 受到了代表们的热烈欢迎和高度评价。

本次会议共发表论文 138 篇(其中特邀报告 4 篇), 其论文集以光盘和论文摘要集的形式出版。内容包含振动一般理论、结构动力学、机械动力学、耦合问题动力学、土动力学、转子动力学、非线性振动、随机振动、摩擦与冲击引起的振动、模态分析与试验、动态测试与信号分析、振动与噪声控制、故障诊断理论及其应用等方面。

本次会议也得到了兴华科仪公司、思非吉中国有限公司、迪飞公司、扬州无线电二厂、四三八〇嘉兴分厂、靖江东华测试技术开发有限公司、北京声望公司、广州精信仪表电器公司等单位的支持, 他们为本次学术交流会议带来了振动测试、分析方面的最新仪器设备及发展信息, 为振动理论和方法付诸实际应用、推动学科不断深入发展提供技术保障。

(李铁柏)