

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2023.02.024

可靠性分析在航空复合材料结构上的应用及展望

李志远¹ 原崇新^{2*}

(1. 上海飞机制造有限公司, 上海 201324; 2. 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

摘要: 基于概率统计的可靠性分析研究对于航空复合材料结构有着重要的意义, 一是航空结构尤其是民航结构的安全性要求极高, 需要尽可能地预测或判断发生故障的可能性; 二是复合材料的变异因素较多, 采用传统设计导致折减系数较高。目前复合材料结构设计仍以安全系数的方法来保证结构的可靠性, 在此过程中并不进行正式的风险评估, 而基于概率的可靠性分析则设定一个可靠性目标来代替安全系数, 但它需更成熟的概率统计方法以及大量的样本数据, 所以只能作为传统结构设计的补充, 在安全裕度不足时进行风险预测。论述了航空复合材料可靠性概率分析的历史演变、意义、主要理论方法以及一般步骤等内容, 同时对复合材料结构的可靠性分析的未来进行了展望, 为复合材料可靠性分析的发展和研究提供一定的参考。

关键词: 复合材料; 可靠性; 安全系数; 失效概率

中图分类号: V258

文献标识码: A

OSID: 

0 引言

随着复合材料结构应用越来越高, 尤其空客 A350 和波音 787 在机身和机翼等主承力结构上大量使用复合材料, 国内外学者对复合材料安全性研究也越来越多。不同于金属可以直接使用原材料进行加工, 树脂基复合材料的成型过程中涉及到树脂的化学反应, 并且在微观上涉及到树脂与纤维的界面黏合、固化热应力等问题。因此航空复合材料性能的影响因素较多并且受制造的影响较大, 比如施加载荷的不确定性(飞机受载不能精确计算)、材料的差异性、使用环境的不同、制造缺陷、使用过程中的损伤等^[1]。现在传统的复合材料结构设计仍然采用确定性设计, 即定义在设计中要满足的一个最严重情况或一个极值, 规定一个安全系数以覆盖未知量, 目前民机复合材料设计过程中一般用下列准则来保证复合材料构件的安全^[2]:

- 1) 最严重载荷×安全系数(1.5);

- 2) 最严重的温湿度条件;
- 3) 最严重的可能的损伤;
- 4) 从保守的统计准则推导的材料许用值(A 基准或 B 基准)。

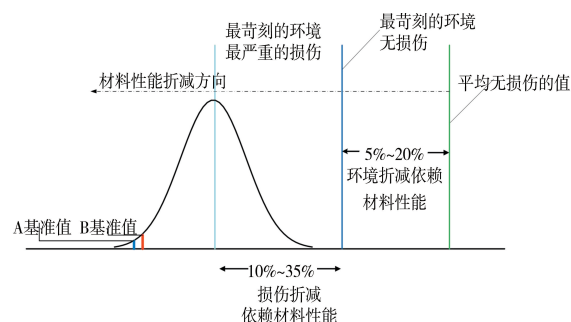


图1 复合材料的折减计算概念

Kassapoglou^[1]对以上的理念进行了举例, 并给出了公式如下:

$$\varepsilon_{des} = 11\,000 \times 0.8 \times 0.65 \times 0.8 = 4\,576\mu \quad (1)$$

其中: ε_{des} 为工程设计时采用的应变值; 11 000 为假设的复合材料在室温干态下的平均应变值; 0.8

* 通信作者. E-mail: yuanchong2012@163.com

基金信息: 国家自然科学基金(51875159)

引用格式: 李志远, 原崇新. 可靠性分析在航空复合材料结构上的应用及展望[J]. 民用飞机设计与研究, 2023(2): 145-152. LI Z Y, YUAN C X. Application and future of probabilistic analysis on aeronautical composite structures[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2023(2): 145-152(in Chinese).

为考虑最严重的环境影响;0.65 为考虑勉强目视可见损伤的影响;0.8 为考虑材料分散影响,需要进行 A 基准值或 B 基准值。

由此可见,复合材料实际上采用的许用值已经进行了很大的折减,但也导致复材的重量较大、结构效率偏低。因此,如果能有一套相对成熟的评价方法可以对复合材料的安全性或者失效概率进行科学评估,可以在一定程度上提高复合材料的结构效率,放宽制造验收标准,降低制造成本。

1 复合材料可靠性分析的意义和概念

1.1 现有复合材料结构设计存在的问题

目前航空结构设计方法中大部分没有考虑输入参数的随机性,比如材料性能、应用环境、载荷等参数,因此航空结构的可靠性处于未知状态,往往需要服役多年以后才能初步评估其可靠性。

从过去 30 年来看,由于结构失效而产生的航空灾难非常少,但这种不能预测未来风险的设计流程仍然存在一些问题:

1) 随着设计变得越来越关键并影响产品的竞争力,需要定量地评估并优化产品的可靠性。在越来越注重产品质量的今天,量化的可靠性是提高产品安全性和经济性的必然趋势。

2) 一些新型的飞行器与传统的使用环境已经大为不同,采用过去的 uncertain 参数不足以提供充分的安全。在这种情况下,如果将所有的不利因素都进行性能上的折减,最终会导致产品结构重量大幅度提升。

3) 复合材料在航空产业上的应用在稳步增长,但复合材料的性能与其工艺制造过程密切相关;与金属相比,复合材料具有更多的内在变异性,因此需要使用更大的折减系数,这会降低材料许用值,导致重量增加,但其结构的可靠性不一定随之增加。

1.2 可靠性分析的意义

可靠性分析是把所有的设计参数都看成变量进行分析,分析得到的结果即发生失效的可能性,从而得到设计参数对最终结构可靠性的影响。如果将加载载荷、几何尺寸、材料性能和目标环境的统计分布结果结合在一起,利用可靠性结果分析方法可以得到:

- 1) 量化的安全性;
- 2) 设计参数的敏感性分析;

3) 成本/重量降低;

4) 最优的检查间隔。

如果知晓设计参数对结构的整体可靠性(或失效风险)的影响程序,设计人员就可以有的放矢地提高其可靠性。因此对于制造过程的控制也可以聚焦那些对整体可靠性影响最大的环节。

1.3 总体概念

可靠性设计是基于概率上的预判,而不是某些特定的判据,它是对整体系统失效的可能性进行分析。它的输出是一些位置及其失效模式。每个位置需要相应的加载应力和材料强度,加载应力一般通过有限元模拟得到,也可以采用一些传统结构力学的方法。一旦可靠性模型建立后,可以进行敏感性分析和优化。敏感性分析揭示失效发生的主要因素,分析人员可以通过改变设计参数在可接受的可靠性下使结构重量最小化。

尽管概率论的发展使人类通过数学对未来进行了预测,但对于飞机设计分析来说,最大的挑战是如何准确地定义什么数据是可以获得的,已有数据对于现有问题的置信度,如何对现有数据进行统计分析并预测飞机的服役性能,多大的失效概率是可以接受的等等。

2 基于概率的可靠性分析的历史

2.1 基于概率分析方法的发展历史

1956 年,美国化学工程师学会在军方实验室的支持下,开展了以基本概率理论来确定安全系数的研究。研究目标包括:明确安全系数的术语定义;对目前使用的现场因素进行调查;推荐这些因素的形式和价值,以便将来使用。历经 10 年的研究,美国化学工程师学会没有找到安全系数与现场因素的确定性关系,但指出概率分析值得更多的研究。

1960–1970 年期间,科学家提出了耐久性和损伤容限的方法。该方法是基于疲劳裂纹扩展的预测定律,在 1970 年代中期得到应用。1967 年,Cor-nell^[3]提出二阶矩公式来评估结构的可靠性,这种方法从参数分布的平均值和方差中计算出安全指数。安全指数被认为是一种对可靠性的表征,可以通过对联合概率密度进行数学积分来确定失效发生的可能性。1973 年,Lind^[4]证明 Cornell 理论可以衍生出安全系数,这是一个具有里程碑意义的结论,因为可靠性分析终于成为可被接受的设计方

法。Hasofer 和 Lind^[5]随后对此理论进行了改进,并形成了基于概率设计理论的基石。

2.2 安全系数的由来

在安全系数的概念尚未形成时,人们经常用2/3的极限应力来定义结构的许用值。随着速度和加速度等概念的引入,人们有了安全系数的意识,并将安全系数初步定成了1.5。这个值正好是铝合金破坏应力与屈服应力的比值,有人认为这是安全系数1.5的由来,目前尚无定论。后来有学者尝试对1.5进行改进,但由于对于材料性能、制造要求的分散性认识不足,并且这个系数已经得到了适航当局的认可,很难去推翻既定的设计系数。目前一般认为安全系数定为1.5是合理的,因为它是基于1920年代和1930年代期间被认为具有代表性的设计许用值与机动载荷的比率。然而与此同时,它是一个不可知的暂定数,因为人们不能确切知道它所保护的是设计、制造和操作过程的何种不确定的变化或异常,也不知道如何量化它们^[6-7]。如果将来随着飞机设计、制造和服役环境的不确定性有所降低,安全系数也是有可能降低到1.5以下的。

2.3 允许失效概率的历史发展

1930年代,根据英国军机的飞行经验,每 10^7 飞行小时可能有一次事故发生。二战后民机的飞行经验也逐步认定飞机的结构失效事故发生概率应该不超过1次/ 10^7 飞行小时。1954年,Freudenthal^[8]指出可接受的失效概率评定应该基于结构的重要性、成本以及失效发生的后果。对于民航来说,可以在允许每 10^7 次飞行小时中有两次失效发生。根据1990年美国空军飞机结构通用规范(AFGS 87221A):当概率方法可用于设计航空飞行器结构时,最大的可接受失效频率是 1×10^{-7} /小时。飞机的结构故障概率分为极不可能($\leq 10^{-9}$)、很不可能($10^{-9} \sim 10^{-7}$)、不可能($10^{-7} \sim 10^{-5}$)、可能($10^{-5} \sim 10^{-3}$)、经常($\geq 10^{-3}$)^[9]几大类。

2.4 民机复合材料研制上的应用情况

目前民机已经采用概率或半概率的适航方法来确定检查间隔,AC20咨询通告中指出^[10],在确定飞机结构的检查间隔时应考虑其可能发生的损伤。强度下降越大,损伤检测应该越频繁。损伤出现概率越大,损伤的检测应该越频繁。因为这些方法需要一些概率的输入数据,所以称为概率或半概率方法。它们最初是由Aerospatiale公司为ATR 72

外翼的验证而开发的,后来又用于A330/340的副翼,随后由ALENIA公司在对ATR的碳纤维尾翼进行验证时完成。

这类运用概率或半概率方法进行损伤容限设计或检查间隔评估的一般步骤为:

1) 按能量-概率曲线确定不同能量的冲击威胁出现的概率(P_a),主要的冲击有工具坠落、跑道碎石冲击等损伤源,每种损伤源都用概率函数模型(如正态分布)来表征。

2) 由积木式试验分析得到结构的剩余静强度-冲击能量(损伤尺寸)曲线;此曲线不是概率性分析,而是通过具体试验数据得到。

3) 确定不同载荷大小出现的概率(P_r),一般限制载荷为 10^{-5} 次/飞行小时,极限载荷为 10^{-9} 次/飞行小时;可用对数线性分布来描述。

4) 确定损伤的检出概率。比如Aerospatiale公司^[11]已经表明,通过详细目视检测可检出深度为0.3~0.5 mm的凹坑,其概率高于0.9。

在实际工程中, P_a 和 P_r 的关系可以采用简化公式来进行分析:

$$P_r \cdot n \cdot P_a < 10^{-9} \quad (2)$$

其中, n 代表飞行次数。

3 可靠性分析的总体理论和方法

由于航空复材结构的复杂性,无法实现完全保真地对其计算,一般采用以下方法进行简化^[12]:

1) 将系统模型简化为可用于可靠性分析的基本结构系统,如并联结构、串联结构和并-串联结构。

2) 考虑主要的失效模式来预测结构系统的可靠性。全部考虑结构系统的失效形式不现实也没必要,因此可只考虑那些产生概率大、对结构系统失效概率影响明显的失效模式。

3) 用近似方法来计算结构系统的失效概率。对于多维的结构系统,需要利用公式(3)来计算,但这种算法计算量大,难以实现,因此一般需要将多维的联合概率密度函数近似地降成低维的概率密度函数。

$$P_f = \int \cdots \int f(x_1, x_1, \cdots x_n) dx_1 dx_2 \cdots dx_n \quad (3)$$

可靠性分析一般包括确定潜在失效模式、确定可接受失效概率、定义设计参数、确定特定位置的

失效概率、确定系统的失效概率等六个步骤^[13]。

3.1 确定潜在的失效模式

一个结构在不同位置发生的失效模式可能是不同的。结构失效的原因主要归为两大类。一是静态的失效,通常是断裂或屈曲,第二类是以疲劳和裂纹扩展为特征的循环失效。基于概率的方法可以用来评估结构在静力和疲劳载荷下的失效概率。

静载荷下的失效(稳定或稳定增加)可能是由于施加的载荷超过结构的承载能力而导致的过应力,或者是由于施加的载荷和现有裂缝增长到临界长度而导致的断裂。

循环载荷下的结构可能受很多因素的限制,例如制造缺陷(裂纹、孔隙、分层)或者循环工作温度、压力和载荷等。金属结构的失效经常伴随着裂纹扩展,但是复合材料的疲劳失效还没有被完全理解,一般被模拟成循环分层扩展或基体开裂。

3.2 确定可接受的失效概率

确定可接受的失效概率是非常复杂的。因为它不仅仅是由进行概率分析的工程师来决定的,而是涉及到法律、技术、社会经济等各方面。对结构进行认证的机构应负责制定结构的总体规范。文献中最常见的建议故障概率值范围为 1×10^{-7} 到 1×10^{-9} ,民机一般要求主承力结构的失效概率在 1×10^{-9} 以下。

如果仅对结构的一部分进行概率分析,则在给定总系统的目标水平的情况下,通过分解来确定此部分的目标故障概率。假如此系统中的所有组件重要性相似且彼此不关联,则分解过程比较简单,但如果是一个复杂的系统,则需要使用故障树分析方法梳理冗余加载路径。

3.3 定义设计参数及其统计表征方法

对于复合材料需要考虑的设计变量主要有:

- 1) 材料的力学性能;
- 2) 服役过程中潜在的外部载荷;
- 3) 复材的制造过程及其对材料强度的影响;
- 4) 服役过程中的环境历程及环境影响因子;
- 5) 制造缺陷和损伤的位置、严重程度、发生概率及其对强度的影响。

在大多数概率分析中,一般将承受的最大应力和结构抵抗该最大施加应力的材料强度用于确定结构可靠性的两个所需概率密度函数(probability

density function,简称 PDF)。这两个 PDF 必须从测试数据或分析中生成。获得以上两个概率密度函数的常用程序是将理论分布模型与实际数据进行拟合优度检验。在某些情况下,拟合优度检验可能有多种类型的分布,选择合适的分布函数对于失效概率的预测非常重要。

要定义一个设计变量,必须指出它可以假设的值以及这些值的概率。与该变量相关的单次试验结果无法准确预测,但可以从大量试验结果中进行可靠地预测。试验样本越大,预测就越准确。设计变量的 PDF 一般选用正态、对数正态、Weibull、beta 和均匀等。

复合材料测试性能受多种因素的影响,包括材料批次差异、测试方法等;且复合材料更易受到环境的影响,因此需要在不同的温度和湿度下进行测试。Weibull 分布是有效进行复合材料性能差异性统计的方法,它可以将函数从对称转向非对称的分布。试验样本越大,极值失真的风险越小,样本的总体均值和标准差之间的近似值越接近。当样本量至少为 30 时,可以使样本标准差足够接近总体标准差。但基于现实考虑,样本量越大,意味着试验成本越高。通过采用小于 30 的样本来进行复合材料力学性能的测试。需指出的是,样本大小不是概率设计的重要因素,因为分布参数的初步估计通过有限的的数据就可以完成。初步估计后再进行每个材料性能的敏感性分析,如果此材料性能对失效的影响较大,则再补充这种材料性能的测试,如果较小,则没有必要浪费时间和金钱去做过多的试验。

3.4 确定结构失效概率

在力学范畴内,结构失效一般指结构承受的载荷超过了其最大强度。对于线性结构可以用经典的力学公式建立载荷与强度的关系式,从而根据输入参数的概率分布函数来计算结构失效的概率。而对于复杂的结构来说,一般通过专用软件来计算结构失效的概率。

多年来,在对结构失效概率的研究中,很多机构开发了专门的结构失效分析软件。Long 等介绍了 1980 年至 1996 年期间美国在可靠性分析领域的软件开发情况^[13]。其中 NASA Lewis 开发的 ICAN 软件,可以从最低的复合材料层级(纤维和基体成分)到更高的层级(层板、层压板)。基于线性弹性理论的细观力学和层压板理论用于计算整体结构

分析所需的单层和层压板级别的属性。软件中考虑了不同的失效准则,例如首层失效准则、纤维断裂准则、修正的变形能量准则和霍夫曼准则等。与此做法类似,蒋远翔^[10]从细观力学即由纤维、树脂的力学性能及其分散性推导出宏观力学即单向板的力学性能及其分散性;之后采用区间估计法,得到层合板的结构可靠度指标。

3.5 确定系统失效概率

对于由多个组件构成的系统,分析其结构可靠性需要用到结构体系可靠度计算方法。如果一个系统的各个组件是独立的,其系统 $P_{f,system}$ 与各个组件的失效概率 $P_{f,i}$ 的关系可表达为^[13]:

$$P_{f,system} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{f,i}) \quad (4)$$

对于飞机结构来说,因其受到各种复杂的载荷条件,假定这些载荷之间不是简单的线性相关的关系,则在任意的两处结构在受整体载荷下的应力是不相关的。在这种情况下,从统计学意义上可以认为两者是独立的。也就是说可以使用公式(4)来进行系统失效的评估。

4 结构可靠性评估方法

在过去的研究中有多种方法被应用于工程的概率分析,比较常见的结构可靠性评估方法主要有蒙特卡洛法、一次二阶矩法、响应面近似法和神经网络方法等^[14]。

4.1 蒙特卡洛法

蒙特卡洛法是针对某系统中每个部分的发生概率进行大量的实验,通过计算此系统的最终频率来确定系统的目标失效概率。蒙特卡洛法的计算结果随着计算次数的增加而逐渐趋近于精确解,因此可通过提高实验次数来预测结果的准确性,但此法会增加运算量,成本较高。蒙特卡洛法的主要优点是它不需要明确的结构化方程,适用面较广。但它的缺点是需要进行大量的实验,且对每个参数的灵敏度没有分析,无法指导后续的优化设计。鉴于蒙特卡洛法的准确性,它通常是其他方法预测精确性的对比参照,许多研究论文中将特定方法的结果表示为蒙特卡洛结果的百分比误差。

如图 2 所示,假如一个复合材料试验件受到的拉伸载荷 F , F 呈正态分布,均值为 31 000 N,方差为 300;试验件的抗拉强度 S 也呈正态分布,均值为

333 MPa,方差为 21;试验件宽度 a, b 均呈均匀分布,其中 a 的范围为 $[28.3, 28.8]$, b 的范围为 $[3.8, 3.9]$;则此试验件失效的概率可用蒙特卡洛法进行组合实验,概率发生的条件为 $g > 0$:

$$g = F - S \cdot a \cdot b$$

在 python 程序中以上变量的分布,可表示为:

$S = np.random.normal(333, 21, 1)$

$a \cdot b = np.random.uniform(28.3 \times 3.8, 28.8 \times 3.9)$

$F = np.random.normal(31\ 000, 3\ 000, 1)$

分别进行不同样本量的实验,结果对比如表 1 所示。

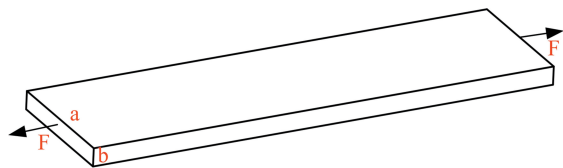


图 2 失效概率计算案例(蒙特卡洛法)

表 1 不同样本量与相应的失效概率结果

计算样本量	失效概率
1 000	0.003
10 000	0.009 1
100 000	0.008 25
1 000 000	0.008 74
5 000 000	0.008 86
6 000 000	0.008 81

由此可看出,随着实验的样本量增加,其失效概率越来越收敛,也越接近精确解。

4.2 一次二阶矩法

一次二阶矩法的基本原理是在随机变量的分布未明确但结构功能函数已经确定的情况下,将结构功能函数或极限状态方程在指定位置通过泰勒展开、梯度求解等方式进行线性化,进而计算结构的可靠度,再通过一定的递归方法进行迭代,最终迭代收敛后得到结构可靠度的近似解^[15]。一次是指将展开为一次线性函数。二阶矩是指只使用随机变量的前二阶矩,即平均值和标准差。因此一次二阶矩是采用只有均值和标准差的数学模型来求解结构的可靠度^[12]。

Sciuba^[16]采用了一次二阶矩的四种算法进行复合材料可靠性分析:快速概率积分法、超球面法、连续逼近法、定向余弦法,并与蒙特卡洛法进行了对

比。笔者认为蒙特卡洛法是容易理解且实现的方法,其精度依赖于实验次数,定向余弦法是计算效率最高的且可以得出输入参数的灵敏度,从而在鲁棒性设计中得到应用。

4.3 响应面近似法

对于复杂结构一阶二次矩方法不再适用,因为它是在已知失效函数的情况下进行可靠性计算的,然而对于大型结构来说,这是不可能的。另外,蒙特卡洛方法虽然可以在不知道失效函数下的情况下进行随机模拟实验,但它需要对每批产生的结构和载荷的随机变量都进行分析,计算量非常庞大。在这种情况下,可以采用响应面方法^[17]。响应面方法的目标是找到一个预测方程,将诸如应力或变形等响应与多个输入变量相关联。一旦完成了这一点,在给定输入变量的值的条件下该方程就可以用来确定响应,而不必重复运行耗时的确定性结构分析。

响应面代表结构分析的结果(或输出),包括所有输入变量的每个合理组合。由此可以通过模拟创建所有设计变量的数千种组合,并对每个变量集执行结构分析,最后只需通过插值查找相应的表面值。因此,结构分析输出的每个近似值都是在几毫秒内生成的。最终结果是创建应力或强度的概率密度函数(PDF)。一旦定义了应力和强度的 PDF,就可以使用其他方法,如数值积分、蒙特卡洛法,来确定失效概率。

响应面方法的一般步骤为:

- 1) 给随机变量赋予预定值,并执行确定性分析(例如 FEM)。
- 2) 使用步骤 1) 的结果,使用回归技术,根据设计变量构建响应变量的近似封闭式表达式。响应变量可能是强度或应力。
- 3) 使用回归方程从设计变量的模拟中创建响应的 PDF。
- 4) 使用数值积分、蒙特卡罗模拟或近似方法从响应的 PDF 中计算出失效概率。

由于典型的输入变量与输出变量之间没有显性的表达式,因而复合材料承压结构的极限状态函数是隐性的,对于这种情况,可以采用响应面方法结合有限元建模进行可靠性分析。李伟国利用响应面方法对复合材料层合板和机匣结构等进行了可靠性分析^[18]。

4.4 神经网络方法

响应面方法虽然适用于隐式极限状态方程的可靠性分析,但它的函数形式要求固定不可调,这限制了它的适用范围。而神经网络响应面法则采用神经网络函数代替固定函数形式。

神经网络是由大量简单的神经元以不同的拓扑结构相互连接而形成的复杂网络系统,虽然每个神经元的结构和功能可能十分简单,但大量简单的神经元构成的网络系统可以实现各种复杂功能。神经网络系统具有并行处理和分布存储的特性,自适应、自组织和自学习能力强,并具有联想记忆等特点。神经网络发展至今,已经有多种算法,但 BP (back propagation) 神经网络是应用最广、研究最多、发展最快的算法。

神经网络已经用于复合材料疲劳寿命预测、动态力学性能、工艺优化、分层分析等^[19] 方面。Lopes^[20] 采用多层感知器网络和径向基网络两种神经网络方法对复合材料进行了可靠性分析,结果发现神经网络可以节省大量的计算时间。杨子政^[21] 将运用传统响应面法、BP 神经网络、Kriging 近似法得到的复合材料层压板的可靠性分析结果进行了对比,发现 BP 神经网络和 Kriging 近似法表现出更高的效率和计算精度,并且 BP 神经网络相比 Kriging 近似法具有更高的精度。

5 结论

可靠性设计对于目前的复合材料设计方法来说是一个强有力的补充或可供选择的方法,但它要求在工程变量统计数据的概率和表征等方面发展出更加成熟的技术,同时也依赖于飞机复合材料在实际服役过程中更多的真实数据。鉴于基于概率分析的复合材料设计可以进一步提高复合材料的结构效率,同时可以进行量化的风险评估,在飞机越来越智能化,数据采集和传输越来越方便,结构健康监测手段越来越多,大数据挖掘和分析方法越来越成熟的今天,可以说可靠性分析在复合材料安全评估领域的发展方兴未艾。

复合材料可靠性分析主要集中在以概率为基础的随机可靠性分析和模糊可靠性分析两方面,随着模糊数学理论的发展,加之复合材料的特性,在分析过程中考虑不确定因素的非概率可靠性研究是今后发展的重要方向。

复合材料的渐进失效及其与可靠性分析的关系在未来值得更多的研究,因为它是关系到复合材料在概率性设计下的优化。在这种情况下,还需要考虑断裂以外的其他失效模式,比如因损伤和分层而引起的强度降低或刚度降低。由于复合材料的性能与纤维、树脂及纤维树脂界面密切相关,建立考虑微观、细观、宏观参数的可靠性分析模型,可以从底层理解复合材料的失效机理,通过进行每个层级的敏感性分析,实现对复合材料结构的多尺度的协同优化设计。

大型复合材料结构的可靠性分析需要更高效的分析方法(如神经网络),而遗传算法则作为优化工具与这些分析方法配合使用。对于一些新涌现的算法,也应该研究其在复合材料上应用的可能性。这些新的算法可能会极大程度地降低大型复合材料结构的计算成本,并且为小概率事件提供足够的精度。

参考文献:

- [1] KASSAPOGLOU C. Design and analysis of composite structures with applications to aerospace structures[M]. Chichester, West Sussex, U. K. : Wiley, 2010.
- [2] USA Department of Defense. Composite materials handbook; MIL-HDBK-17-3F[M]. U. S. : Department of Defense, 2002.
- [3] CORNELL C A. Bounds on the reliability of structural systems[J]. Journal of the Structural Division, 1967,93(1):171-200.
- [4] LIND N C. The design of structural design norms[J]. Journal of Structural Mechanics, 1973.
- [5] HASOFER AM, LIND N C. Exact and invariant second-moment code format[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1974(100):111-121.
- [6] ZIPAY J J, MODLIN C T, LARSEN C E. The ultimate factor of safety for aircraft and spacecraft its history, applications and misconceptions [C]// 57th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. [S. l. : s. n.], 2016.
- [7] MULLER G E, SCHMID C J. Factor of safety - USAF design practice[R]. U. S. : NASA, 1978.
- [8] FREUDENTHAL A M. Safety and the probability of structural failure[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1956,121(1):1337-1375.
- [9] 成伟. 飞机的安全性历史和相关标准[R/OL]. (2017-02-15) [2022-09-14]. [https://max. book118. com/html/2017/0215/91700851. shtm](https://max.book118.com/html/2017/0215/91700851.shtm).
- [10] FAA. Composite aircraft structure; AC 20-107B[S]. U. S. : FAA, 2009.
- [11] AEROSPATIALE. Substantiation of composite parts - impact detectability criteria[S]. [S. l. : s. n.], 1991.
- [12] 葛锐. 复合材料层合结构的可靠性设计方法及优化算法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2008.
- [13] LONG M W, NARCISO J D. Probabilistic design methodology for composite aircraft structures[R]. U. S. : Federal Aviation Administration, 1999.
- [14] AFSHARI S S, ENAYATOLLAHI F, XU X Y, et al. Machine learning-based methods in structural reliability analysis: A review[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022(219):108223.
- [15] 蒋远翔. 复合材料结构可靠性的多尺度优化方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2017.
- [16] SCIUVA M D, LOMARIO D. A comparison between monte carlo and forms in calculating the reliability of a composite structure[J]. Composite Structures, 2003(59):155-162.
- [17] 朱静, 郭军, 陆鑫森. 一种新的结构可靠性计算方法——响应面法[J]. 上海交通大学学报, 1995(2):26-31.
- [18] 李伟国. 复合材料层合结构可靠性优化方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2005.
- [19] CHIACHIO M, CHIACHIO J, RUS G. Reliability in composites-a selective review and survey of current development[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(3):902-913.
- [20] LOPES P A M, GOMES H M, AWRUCH A M. Reliability analysis of laminated composite structures using finite elements and neural networks[J]. Composite Structures. 2010,92:1603-1613.
- [21] 杨子政. 可靠性分析新方法研究与应用[D]. 西安:西北工业大学, 2006.

作者简介

李志远 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:复合材料工艺及试验技术。E-mail: lizhiyuan@comac. cc
原崇新 男,博士,正高级工程师。主要研究方向:复合材料工艺及试验技术。E-mail: yuanchong2012@163. com

Application and future of probabilistic analysis on aeronautical composite structures

Li Zhiyuan¹ YUAN Chongxin^{2*}

(1. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd, Shanghai 201324, China;

2. Beijing Aircraft Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: Reliability analysis based on probability and statistics is of great significance for aviation composite structures. One is that the safety requirements of aviation structures, especially civil aviation structures, are extremely high, and it is necessary to predict the possibility of failure as much as possible. The second is that there are more variation factors in composite materials, and the traditional design leads to a higher discount coefficient. At present, the composite structural design still uses the method of safety factor to ensure the reliability of the structure. In this process there is no formal risk assessment, and the reliability analysis based on probability sets a reliability goal to replace the safety factor, but it requires more mature probability and statistical methods and a large number of sample data, so it can only be used as a supplement to the traditional structural design, and the risk prediction is carried out when the safety margin is insufficient. This paper discusses the historical evolution, significance, main theoretical methods and general steps of reliability probabilistic analysis of aeronautical composite materials, and looks forward to the future of reliability analysis of composite structures, providing a certain reference for the development and research of the reliability analysis of composite materials.

Keywords: composites; probabilistic analysis; factor of safety; probability of failure

* Corresponding author. E-mail: yuanchong2012@163.com