



飞行器复合材料结构优化设计研究进展

王晓军*, 马雨嘉, 王磊, 邱志平

北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100083

* 联系人, E-mail: xjwang@buaa.edu.cn

收稿日期: 2017-02-07; 接受日期: 2017-04-14; 网络出版日期: 2017-06-30

国家自然科学基金(编号: 11432002, 11372025, 11572024)和国防基础科研项目(编号: JCKY2016601B001, JCKY2013601B001)资助

摘要 随着飞行器设计要求的日益提高,且服役环境异常严酷,发展新型材料和新结构迫在眉睫,而复合材料凭借高比强度、高比刚度、耐疲劳、抗腐蚀等优点,在现代飞行器结构的设计与制造中得到了广泛应用.复合材料结构的可设计性为设计人员提供了更为广阔的设计空间.因此,复合材料结构的优化设计问题逐渐受到国内外科研工作者的热烈讨论.本文针对国内外在复合材料结构优化设计理论方面取得的成果进行了系统的综述,主要内容包括安全系数优化设计、可靠性优化设计及鲁棒优化设计,分别阐述了以上优化理论在复合材料结构优化设计领域的应用,探讨了3种优化设计理念之间的继承与发展关系,并分析了复合材料结构优化设计当前存在的主要问题和今后的发展方向.

关键词 复合材料结构, 飞行器, 可靠性优化, 安全系数, 鲁棒优化

PACS: 46.05.+b, 72.80.Tm, 42.15.Eq

复合材料的研发及应用水平已经成为衡量一个国家科技水平的重要标杆,鉴于复合材料无可比拟的优越性,被广泛应用于国防、建筑、医学、生物等领域.尤其在航空航天等飞行器设计与制造领域,复合材料已成为最具“生命力”的新型材料之一.复合材料的轻量化、高强度、耐疲劳、耐腐蚀等特性证明了复合材料的巨大应用潜力.美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的Langley研究中心在“航空航天用先进复合材料发展”报告中指出,各种复合材料技术的应用可以使亚音速运输机获得51%的减重,美国第四代战机F-22的复合材料用量高达24%,波音787的复合材料用量达到52%,欧洲

共同研究开发的“恶魔”无人机,其主要机体结构全部采用复合材料结构^[1].国内,从最初的复合材料口盖到三代歼-10的复合材料鸭翼结构,再到某新型飞机的全复合材料整体化机翼壁板,复合材料的应用经历了从无到有,不断增加的过程.数据结果表明,复合材料相较于金属材料能够有效减重25%~30%,并大幅改善飞行器的气动特性^[2].

复合材料最大优势在于刚度可设计性,通过对铺层角度、铺层厚度的设计进而达到飞行器用复合材料结构的强度、刚度要求,根据不同的承载要求进行合理的气动剪裁,满足强度、刚度要求的同时,改善气弹特性.随着一体化成型技术的发展,复合材料铺

引用格式: 王晓军, 马雨嘉, 王磊, 等. 飞行器复合材料结构优化设计研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 014602
Wang X J, Ma Y J, Wang L, et al. Advances in the optimization design study for aircraft composite structure (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 014602, doi: 10.1360/SSPMA2017-00043

层工艺日益成熟,大大减少了应力集中与初始缺陷引起的应力分布不均等情况,使得结构整体安全性大幅度提高. 复合材料给飞行器结构设计带来巨大提升空间的同时也带来了许多问题和挑战. (1) 与传统金属材料相比,复合材料的设计空间大,设计参数众多,除了几何参数外,还包含铺层角度、铺层厚度等铺层参数,集中表现为一种组合爆炸问题,参数之间相互耦合,特别是在飞行器结构设计中,涉及多个学科领域,服役环境的复杂性更加剧了这种耦合效应的不确定性,因此传统的人工调参方法难以解决该问题; (2) 复合材料性能与响应的分散性远高于金属材料,在结构分析与计算中引进的假设与近似计算也会使计算模式与实际情形有所偏离,合理表征材料分散性是进行结构优化设计的前提. 因此,如何利用有限的资源高效、准确地给出合理的复合材料结构优化设计方案,充分发掘复合材料的优良力学性能潜力,成为当今各国科研工作者的热点关注问题. 基于此,本文针对目前的复合材料优化设计方法进行了系统的总结与阐述.

1 复合材料结构安全系数优化设计

1.1 安全系数的选取

20世纪20年代,美国首次在适航性条例中引入了“安全系数”概念,“安全系数”是人们在结构设计过程中,为了弥补设计不足,尽可能全面地涵盖难以量化的影响因素,保证结构在整个生命周期中安全可靠,根据生产经验和设计分析所提出的一种放大系数. 这为结构优化设计提供了便利途径,将难以量化的约束条件转换为安全系数包络,进而大大简化了分析过程. 传统优化设计方法的关键在于“安全系数”的确定,合理的安全系数能够较好地平衡费用与性能之间的关系. 康恩^[3]所著《飞机强度计算》一书中对安全系数给出了如下说明,为了使结构不会在使用载荷下破坏,结构应有一定的剩余强度. 也就是说,破坏载荷 $P_{\text{极限}}$ 应该超过规定的使用载荷 $P_{\text{许用}}$ 的一定倍数,该倍数称为安全系数 f ,即

$$f = \frac{P_{\text{极限}}}{P_{\text{许用}}}. \quad (1)$$

吴铁民^[4]认为,复合材料设计所用的安全系数 f 是由金属材料(铝合金)设计中沿用并发展起来的,考虑

到复合材料有更大的分散性,所以需要增加一个附加安全系数值,即

$$f_{\text{复材}} = f_{\text{基础}} \times f_{\text{附加}}, \quad (2)$$

其中, $f_{\text{基础}}$ 为铝合金安全系数, $f_{\text{附加}}$ 为复材结构考虑分散度后提供备份强度的附加安全系数. 结合复合材料结构固有的特性进行选取,复合材料的安全系数体现在附加系数上. 目前,国内外大多数国家均采用文献^[4]所提到的安全系数取值,并给出了附加系数所涵盖的因素

$$f_{\text{附加}} = f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \times f_5, \quad (3)$$

其中 f_1 表示成型工艺影响因素,一般手糊法取1.6,喷射法取2.0,机械化生产取1.4; f_2 表示长期使用蠕变影响因素,由经验或试验确定,一般取1.2–2.0; f_3 表示使用温度因素,取决于树脂热变形温度,一般取1.0–1.25; f_4 表示循环应力影响因素,取决于循环次数,一般取1.1–2.0; f_5 表示固化工艺影响因素,常温固化取1.5,升温固化取1.1.

国际上对复合材料结构的安全系数取值并不统一,均是从金属安全系数的取值出发结合式(2)给出. 对此,欧美发达国家对基础安全系数的选取做了深入的讨论与研究. 美国对于典型飞行器规定了极限载荷量值为6g,同时又规定限制载荷为3g,在最不利的飞行工况下,期望实际出现的载荷为3g,最早的飞行器设计安全系数的取值为2.0. 随后,1934年国际民用适航性组织(International Civil Airworthiness Organization, ICAO)首次把1.5作为安全系数写入规范,由于早期飞行器材料均以铝合金为主,试验数据表明,2024铝合金的极限强度与屈服强度之比约为1.5,这也是安全系数取1.5的基本理论依据. 英国通过大量试验统计,安全系数取值经历了一个调整过程,为了保证飞行器绝对安全,早期安全系数取值为2.0,在后续的设计过程中发现,追求绝对安全是以大幅度牺牲飞行器性能为代价的,20世纪30年代由2.0降为1.5. 法国军用规范AIR2004/E选用美国标准,安全系数取为1.5. 德国在飞行器设计方面,综合试验数据以及美国标准,安全系数调整为1.8. 目前,国内各院所所采用的基于安全系数的优化策略均沿用美国标准安全系数选用1.5^[5].

1.2 基于安全系数优化设计

由于安全系数概念明确,简便易行,针对复合材

料结构的安全系数的优化设计方法得到了迅速发展, 并取得了丰硕成果. Schmit等人^[6]、Ashley^[7]、Lansing等人^[8]提出一套完整的提高结构优化算法计算效率的求解思路, 从而使得结构优化设计走向了成熟. 复合材料结构的传统优化方法一般以强度和刚度为约束条件, 重量为优化目标进行优化, 即寻求满足使用需求情况下的最小重量. 复合材料结构的优化列式可以表达为

$$\begin{aligned} & \text{find } : t_i, \theta_i, \\ & \min W = \sum_i^n W_i = \sum_i^n \rho_i t_i S_i, \quad (4) \\ & \text{s. t. } g_j(t_i, \theta_i) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, l, \end{aligned}$$

其中, t_i 表示第*i*层厚度, θ_i 表示铺层角度, ρ_i 表示第*i*层的材料密度, S_i 表示第*i*层的截面积, W 表示结构总重量, $g_j(t)$ 表示第*j*个约束方程, 包括刚度、强度、屈曲等约束条件. 通常在约束条件中, 均引入安全放大系数对各种不确定因素进行包络, 以提高结构设计的安全性.

Akbulut等人^[9]将最大应力与蔡-吴准则相结合作为层合板结构的失效判定准则, 同时考虑面内与面外失效模式, 采用模拟退火全局优化算法对层合板进行优化. McDonald等人^[10]结合安全系数优化设计与粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)建立了数学优化模型, 对复合材料层合板进行优化设计, 从而避免了复杂极限状态函数可靠性指标的繁琐求解过程. Singha等人^[11]采用遗传算法对复合材料层合板进行了结构优化, 以结构总厚度不变为约束, 以每层的纤维方向角和厚度作为设计变量, 以临界热屈曲温度为目标函数, 采用四节点板单元的有限元法解决了层合板的热屈曲优化问题. Irisarri等人^[12]结合多目标进化算法, 提出一种新的初始化策略, 即引入非典型铺层角度, 对复合材料层合板抗屈曲能力进行铺层顺序优化, 说明了方法的可行性; Lopez等人^[13]在复合材料层合板的优化设计中, 同时考虑分析的精细化以及工程的可用性, 建立起了安全系数与可靠性的对应关系, 进而采用安全系数结合粒子群优化算法对层合板结构进行了优化设计, 并得到了较好的设计结果.

刘克龙等人^[14]统计分析了大量实验数据, 从强度和刚度两个方面对纤维增强树脂基结构设计中基于

基准许用值的安全系数的取值问题进行了研究, 为复合材料优化设计提供了重要的参考依据. 羊玲等人^[15]在安全系数的基础上, 发展了该指标, 综合考虑了复合材料层合板结构的不同失效模式所对应的可靠度, 提出了“综合安全系数”概念, 并基于此对复合材料层合板结构进行了优化, 通过试验验证了方法的有效性. 穆朋刚^[16]提出一种结合蚁群全局优化算法(Ant Colony Algorithm, ACA)的层合板结构铺层顺序优化方法, 以安全系数来覆盖载荷、材料分散性, 提高了优化收敛速度. 庄三少^[17]发展了一种基于直接搜索模拟退火算法(Direct Search Simulated Annealing Algorithm)和有限元方法(Finite Element Method, FEM)的复合材料层合结构的优化方法并对某型航空发动机机匣质量进行铺层顺序优化, 在保证机匣安全的前提下, 实现了机匣质量有效减轻. 张彦考等人^[18]建立了适合于大型复合材料结构的优化设计方法, 该方法在建立有限元模型时应用了区域划分技术, 然后结合确定性安全系数优化方法, 对结构分两级进行优化以复合材料工字梁结构为例证明该优化算法的高效.

由以上研究成果可以看出, 复合材料结构优化设计问题成为热点, 随着复合材料在现代飞行器设计中的应用比例逐渐增加, 在飞行器设计与试验过程中, 设计人员发现复合材料自身的各向异性、非均质性等特征以及服役环境中存在的多源不确定因素, 载荷分散性与材料分散性相互交织, 导致复合材料的失效机理复杂, 阻碍了复合材料在航空航天领域的应用进程. 因此, 国内外学者提出了一种基于安全系数的复合材料结构优化设计方法, 以安全系数取值覆盖结构中出现的各种极端不确定因素, 在飞行器设计领域得到广泛应用并沿用至今.

2 复合材料结构可靠性优化设计

20世纪40年代, 工程技术人员已经认识到, 不确定因素的影响在产品的安全性评估及设计过程中越来越不能被忽视, 针对飞行器设计与制造行业, 尤为明显. 目前, 世界各发达国家一直在寻求飞行器结构在满足各项强度、刚度、隐身、防热等多目标的前提下, 大幅度减轻结构重量, 以提高飞行器性能. 然而传统的优化方法仅采用一个笼统的安全系数来描述各种不确定因素, 造成了材料的浪费及结构性能的冗

余. 历经半个多世纪的发展, 可靠性分析理论逐渐受到各国学者的重视, 随后, 基于结构可靠性的优化策略开始兴起, 并已经成为国内外学者研究的主要方向, 它解决了人们对不确定性的粗略认知, 使得优化设计方法沿着更加精细化的方向发展^[19].

2.1 结构可靠性分析

Mayer等人^[20]首先把这种不确定性的概率、统计方法引入到产品的安全评定中, 后来Freudenthal^[21]采用全概率分析方法, 建立了在初始损伤条件下的结构系统随机可靠性分析的数学模型, 并于1947年发表了“结构安全度”一文, 建立起具有随机性质的常规可靠性理论基础. 结构可靠性分析的本质是求解失效概率, 基本步骤可以分为两步: 第1步, 建立结构极限状态方程, 通常所说的应力-强度干涉模型即为一个典型的极限状态方程; 第2步, 求解极限状态方程的失效概率, 进而求得可靠度. 目前, 常用的结构可靠度求解方法主要有二次二阶矩法(First Order Second Moment Method)、随机有限元法、Monte Carlo法等基于概率理论的求解方法以及近年兴起的非概率可靠性求解方法.

2.1.1 一次二阶矩(FOSM)分析法

一次二阶矩法(First Order Second Moment, FOSM)在结构分析中, 将非线性的极限状态函数线性化, 通过一阶级数展开来实现, 然后利用基本变量的一阶矩和二阶矩, 也就是均值和方差, 来计算线性化后的极限状态函数的一阶矩和二阶矩, 进而近似求解结构的失效概率及可靠度, 该方法概念明确, 计算效率高, 因此在国际上得到了广泛的应用. 针对不同的失效模式, 已经形成了丰富的研究成果. Kam和Chang^[22]利用首层失效假定和一次二阶矩法对复合材料层合板的静强度可靠性进行了理论分析, 他们通过实验得到材料的强度参数并利用各种不同的数值计算方法求得结构的首层失效载荷, 结果的正确性通过实验验证; Dey等人^[23]针对复合材料疲劳失效模式, 建立了锥形复材结构的疲劳可靠性求解模型, 结合有限元分析及一次二阶矩方法对锥形复材结构的疲劳可靠性进行了评估, 并通过试验数据验证了方法的有效性; Kogiso等人^[24-26]研究了复合材料损伤容限可靠度问题, 由于复合材料层合板的微小初始缺陷可以引起很大的弯曲应力, 因此, 他们把

初始缺陷和强度参数以及材料参数作为随机变量, 并利用一次二阶矩法研究了层合板在有初始缺陷情况下的可靠性; 陈建桥等人^[27]基于最终层失效准则的可靠性分析方法, 对复合材料层合板可靠性求解方法和算法进行讨论, 将随机载荷与结构强度作为随机变量, 结合一次二阶矩法求解单层板失效概率, 将层合板结构作为一个系统考虑, 利用系统可靠性理论给出层合板的可靠度; 安伟光等人^[28]在复合材料层合板可靠性的分析过程中, 在陈建桥等人^[27]的基础上, 结合蔡-希尔理论和层合板分层判据, 考虑了疲劳、静力及刚度等多种失效模式之间的相关性, 结合一次二阶矩法求解单层板可靠性指标并基于终层失效理论, 利用分枝限界法寻找主要失效路径, 最后通过PNET法计算系统失效概率.

2.1.2 随机有限元分析法

随机有限元法是将确定性的有限元分析理论与概率理论(一次二阶矩等)相结合的一种方法, 可以用来处理结构中存在的随机变量等问题. 因此, 为求解结构力学响应及可靠性分析提供了一种新的思路. Onkar等人^[29]应用随机有限元法对层合板结构的可靠性进行了研究. 在文中指出, 来自材料、载荷等的不确定因素作为随机变量, 利用随机有限元方法求解结构力学响应, 进而建立可靠性分析模型, 结合首层失效理论及Hoffman失效判据, 利用一次二阶矩方法求解层合板结构的失效概率, 通过算例证明了该方法的合理性; Venugopal^[30]研究了含初始缺陷的复合材料层合板的可靠性问题, 通过实验测定结构的强度分布及材料参数分布, 利用有限元方法计算超过缺陷给定距离时的平均应力, 建立极限状态方程, 最后结合随机有限元法及试验结果求解可靠度指标; 宋云连等人^[31]、李应波等人^[32]、陈顺祥等人^[33,34]在研究复合材料结构可靠性的过程中, 均将材料属性、外部载荷等参数作为随机变量, 利用随机有限元法求解结构的力学响应, 结合应力强度-干涉模型构建极限状态方程, 通过一系列的可靠性求解方法给出可靠度指标.

2.1.3 Monte Carlo分析法

Monte Carlo法是最为通用的方法, 实质为枚举法. 基本原理是对随机变量进行大量抽样, 结构失效点落在安全域外的个数占抽样总数的比率即为其失效概

率. Ibnabdeljalil等人^[35]对含初始缺口的三维单向带层合板结构强度可靠性进行了研究, 基于Monte Carlo数值方法来求解结构应力分布, 模拟结构损伤过程, 最终给出单层板结构强度可靠度; Jeong和Shenoi^[36]利用Monte Carlo法分析了简支矩形反对称层合板正交铺设和角铺设时的概率强度, 采用不同的失效准则作为极限状态方程分别计算, 并对分析各种不同极限状态方程求得的结果; 姚磊江等人^[37]用基于唯象的剩余强度衰减模型与蔡-希尔失效判据, 建立单向层合板在任意复杂面内应力作用下的疲劳失效准则, 利用Monte Carlo模拟方法计算层合板的疲劳寿命, 并对其进行可靠性评估; 郝志明等人^[38]针对复合材料回转结构, 利用Monte Carlo法模拟结构载荷、材料参数和强度的随机性, 在Monte Carlo法中采用了 β 球抽样改进来并结合各层应力和蔡-希尔准则对各层进行失效判定计算结构可靠度.

2.1.4 非概率可靠性分析法

非概率可靠性理论是区别于概率统计理论外的另一种不确定变量分析方法. 随着结构日益复杂化, 特别是大型结构难以通过大量试验来获取变量的统计分布规律, 概率统计方法显然难以适用于各种情况. 针对此问题, 国内外研究学者开展了非概率可靠性理论研究, 并取得了一些成果. Ben-Haim等人^[39-41]在文章中对非概率可靠性理论做了详细介绍. 指出不确定性可以用概率与非概率两种方法来描述, 当概率信息难以获得时, 非概率理论给出一种可行办法, 将不确定性通过凸集模型来表述, 建立非概率极限状态方程, 利用最优化理论求解结构可靠度; 邱志平^[42]在《结构可靠性分析与优化设计的非概率集合理论》一书中系统阐述了非概率理论凸模型量化、传播分析及可靠性求解等相关内容; 王晓军等人^[43,44]针对概率可靠性模型和模糊可靠性模型关于原始数据要求高的局限性, 将影响结构可靠性的不确定性通过区间集合来描述, 提出了一种新的结构可靠性分析的非概率集合模型, 并结合传播分析方法对复合材料层合板响应进行了分析; 郭书祥等人^[45,46]用非概率的凸集模型模拟结构的不确定性, 将结构的不确定参数描述为区间变量, 基于区间分析, 提出了一种新的非概率可靠性度量体系及分析方法, 并给出了非概率可靠性指标的三种求解方法; 王向阳和陈建桥^[47]将非概率可靠性理

论引入复合材料可靠性分析, 建立了一种包含概率和非概率分析的混合模型. 对存在初始缺陷的层合板系统, 通过Tsai-Wu准则进行强度分析, 运用一阶矩方法得到可靠性指标, 来评估复合材料层合板系统的可靠性. 除此之外, 非概率可靠性分析方法在其他工程结构问题中也得到了广泛的应用. Kang等人^[48,49]将非概率可靠性理论拓展到结构的拓扑优化设计领域; 岩土力学领域中的可靠性分析同样面临概率统计信息缺乏的困难, 基于此, Jiang等人^[50]、赵明华等人^[51]均基于非概率可靠性理论进行了相关的分析与讨论; 李云龙等人^[52]将非概率理论引入控制领域提出了可靠控制的应用研究. 总体来看, 关于非概率理论研究在各领域已广泛开展但有待深入, 尤其是针对复合材料结构的非概率可靠性求解方法更是少之又少.

相对于概率可靠性, 非概率可靠性理论在信息量有限的情况下更具优势, 已然成为一种新的发展趋势, 但其求解精度与合理性有待商榷, 针对此问题, 一些学者开展了概率与非概率可靠性方法的相容性研究, 并取得了一定成果. 郭书祥等人^[53]对提出的非概率可靠性方法和广泛使用的传统的概率可靠性方法, 在建模思想、模型结构和基于可靠性的结构优化设计等方面进行了比较研究, 进一步说明了非概率可靠性方法的有效性和实用性; 孙海龙等人^[54]介绍了结构可靠性度量方法的发展历史. 按结构可靠性度量中是否引入概率的概念将可靠性度量方法分为两类: 概率体系下的方法和非概率体系下的方法, 分析了概率体系和非概率体系下可靠性度量方法的相互关系, 证明了概率与非概率可靠性分析的相容性.

2.2 结构可靠性优化设计

2.2.1 结构耦合优化方法

结构可靠性求解理论发展趋于成熟, 技术人员也逐渐认识到安全系数优化设计方法的不足, 如何在满足结构各指标要求的前提下, 实现结构最优化设计等问题, 可靠性优化方案成为科研人员所关注的重点. 与传统安全系数优化方法不同的是, 把结构的可靠度指标结合到优化问题的约束内, 或者结合到优化问题的目标函数内, 即在一定的结构系统可靠性指标下, 通过同时调整设计变量参数, 包括厚度、角度等, 使结构达到预期目标, 其优化列式如下:

$$\begin{aligned}
 & \text{find } : t_i, \theta_i, \\
 & \min W = \sum_i^n W_i = \sum_i^n \rho_i t_i S_i, \\
 & \text{s. t. } g_j(t_i, \theta_i) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, l, \\
 & R_s(t_i, \theta_i) \geq R_i^{\text{criteria}}, \quad i = 1, 2, \dots, n,
 \end{aligned} \tag{5}$$

其中, R_i^{criteria} 为结构目标可靠度, 结构可靠度 R_s 作为约束条件纳入优化数学模型中. Kogiso等人^[55,56]以铺层角度为设计变量, 以可靠度最大为目标函数来分别考虑复合材料层合板的屈曲优化问题及复合材料管壁厚度优化问题. 考虑外部载荷与材料属性的随机性, 结合有限元法及一次二阶矩法求解结构屈曲可靠度指标, 以数值算例与确定性优化结果进行比较, 说明可靠性优化理念的先进性; Eamon等人^[57]对于大型的复合材料结构开展了可靠性优化研究, 通过分级优化方法, 先利用可靠性分析理论对元件级结构进行分析, 而后通过元件级分析结果对整个系统进行后优化处理, 与确定优化结果相比, 减重5%, 失效概率降低50%; 李为吉^[58]在研究复合材料层板在各种载荷作用下, 考虑强度约束、刚度可靠性约束时的优化设计方法, 给出各层的最优厚度. 对强度约束, 使各层都满足强度准则; 对位移约束, 采用基于Kuhn-Tucker条件的优化准则法, 从而导出改进设计变量, 使各分层达到最优厚度的迭代式, 通过算例表明本方法具有较高的效率; 韩旭等人^[59]提出了一种优化复合材料帽型加筋壁板稳定性的有效方法, 通过有限元分析建立等效模型, 以可靠性指标为约束, 把层合板铺层厚度和铺层次序优化转化为单层板的优化问题, 这样迭代次数少, 收敛速度快.

2.2.2 结构分步优化方法

由上述优化问题的求解过程可以看出存在两个问题: (1) 厚度变量和角度变量互相耦合, 若同时寻优, 对优化算法提出了更为苛刻的要求, 计算量大且收敛困难; (2) 考虑复合材料加工工艺限制, 厚度与角度均有规定, 角度有 $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ 等4种角度, 铺层对称性问题以及铺层顺序问题. 例如, 相同角度铺层不能连续超过4层; 相邻两层的角度不能超过 60° ; 最外层必须是 0° 或者 90° 等. 因此该情况明显是离散型优化问题, 一般优化方法可能得不到满足工艺条件的角度, 工程难以推广应用. 针对此问题, 一种分步优化求解策略被提出. 其主要思想是: 通过对优化目标的解耦, 分别以

结构重量、铺层顺序为目标函数, 进行分步优化. 这样有效避开了铺层厚度与角度相互耦合的繁琐分析过程, 大大提高了优化设计效率. 优化步骤为: 首先, 以结构质量最轻为目标, 以刚度、强度可靠性为约束条件, 开展设计变量的寻优迭代计算, 直至收敛获取变量最优值; 其次, 在第一步优化结果的基础上, 以铺层顺序为目标, 以刚度、强度为约束条件, 开展第二步优化计算, 获取在满足减重的前提下获得铺层顺序最优的设计方案, 其优化列式如下:

$$\begin{aligned}
 & \text{Step 1} \\
 & \text{find } : t_i (i = 1, 2, \dots, n), \\
 & \min W = \sum_i^n W_i = \sum_i^n \rho_i t_i S_i, \\
 & \text{s. t. } g_j(t) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, l, \\
 & R_s(h, \theta_i) \geq R_i^{\text{criteria}}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \\
 & t_i \in [t_i^L, t_i^U], (i = 1, 2, \dots, n); \\
 & \text{Step 2} \\
 & \text{find } : \theta_u, (u = 0^\circ, +45^\circ, -45^\circ, +90^\circ), \\
 & \text{s. t. } g_{j^*}(t) \leq 0, \quad j^* = 1, 2, \dots, k.
 \end{aligned} \tag{6}$$

分步解耦优化策略在国内复材优化领域发展迅速, 并涌现出一些成果. 修英姝等人^[60]建立了满足铺层结构稳定性的优化铺层体系, 优化体系分两步进行优化: 第1步, 通过建立的神经网络模型确定规定角度下的铺层数(层板重量); 第2步, 采用遗传算法优化这种铺层结构下的铺层顺序, 最终在同样重量下获得了最佳的结构铺层; 常楠等人^[61]提出一种基于复合材料层板稳定性的铺层参数优化设计方法, 首先利用最大应变能准则优化分层厚度, 利用库塔条件推导出层合板单元厚度迭代公式优化单元厚度, 完成层板厚度与铺层比例优化; 在此基础上优化层合板铺层顺序, 最终设计出满足稳定性要求的最佳层合板铺层. 并通过算例分析表明, 该优化方法收敛速度明显提高. 方雄等人^[62]采用两级分步优化方法对复合材料大展弦比机翼结构进行优化设计, 将优化过程按照变量类型分为铺层厚度优化和铺层顺序优化. 先将机翼沿展向进行分段, 然后简化铺层方式并对所有复材结构做铺层厚度优化, 再根据刚度等效原理对所有复材结构做铺层顺序优化, 并以算例证明该方法具有很好的优化效果. 张彦考^[63]、侯玉品^[64]、岳珠峰课题组^[65,66]对复合材料层合结构均采用分步进行优化分析, 通过算例证

明了此方法的可行性及合理性.

2.2.3 非概率可靠性优化方法

前述的可靠性分析及优化方法均基于概率理论, 并且已经发展得相当成熟, 但针对概率信息不足的情况, 研究人员已经开始探索小样本条件下的可靠度求解及优化问题. 针对概率信息不足的小样本问题, 目前在概率框架下研究成果丰富. Tang等人^[67]引入信息熵原理, 权重系数并结合贝叶斯蒙特卡洛法, 建立了针对小样本的模糊可靠性评估方法; Ding等人^[68]考虑航空发动机轴承可靠性试验昂贵, 基于韦布尔分布, 将贝叶斯点估计与加权最小二乘法引入小样本可靠性评估, 获得失效累积分布, 通过试验数据说明了方法的适用性; Zou等人^[69]针对传统的基于贝叶斯理论的小样本可靠性评估问题, 提出了一种新方法, 利用支持向量机进行小样本条件下的可靠性评估, 与贝叶斯方法结合可以大幅度提高效率与精度. Xiong等人^[70], Fu^[71], Jin等人^[72]在小样本可靠性分析方面进行了深入研究.

在非概率理论框架下, 针对概率信息不明的小样本可靠性分析及优化方面, 非概率优化设计理论更具适用性, 但需要强调的是在进行非概率可靠性分析及优化前, 不确定参数的精确量化分析是前提, 目前, 比较常用的方法有区间模型、凸模型及模糊理论等. 亢战等人^[73]在研究桁架结构的鲁棒性优化设计问题时, 考虑桁架结构弹性模量的不确定, 并用非概率椭圆凸模型处理不确定参数. 王晓军等人^[74,75]通过建立包含全部有限样本点的最小区间/超立方体域来描述不确定参数的变化范围; 借助于最小区间参数集进行不确定参数的定量化, 同时也提出了基于测量数据的模糊分析方法. 该方法利用差值因子构造了不确定参数的隶属度函数, 对不确定参数的有限个分散数据进行不确定性描述和定量化处理.

在不确定性定量化的基础上, 开展非概率可靠性的优化设计问题研究, 从现有文献来看, 相对较少, 但已经受到一些学者的重视, 并取得了一些初步性成果. Luo等人^[76]在研究复合材料梁结构的优化设计问题时, 同时考虑了概率与非概率的混合不确定性, 以混合可靠性指标为约束条件, 并通过与确定性优化的近似转换, 提高寻优效率, 减少计算工作量; 亢战等人^[77]研究考虑非概率可靠性指标约束的结构优化问题时, 建立了基于不确定性的凸模型描述的结构优化模型, 提

出了一种基于目标性能的优化方法来求解此优化问题, 通过算例验证了方法的正确性; 同时该作者在文献^[78]中考虑了参数的不确定但有界的特点, 提出了基于非概率可靠性的结构优化设计方法; 邱志平课题组^[79,80]针对复合材料固有频率响应分析问题, 提出了基于非概率可靠性理论响应分析, 对点阵复合材料结构的振动特性问题进行分析, 并基于此, 进一步开展复合材料结构区间优化问题求解; 王晓军等人^[81,82]考虑到结构系统参数的不确定性, 基于提出的非概率凸模型可靠性指标的新定义, 研究了结构优化设计的数学模型和求解方法, 并在复合材料结构声振耦合问题分析中, 应用所建立的非概率优化方法进行优化分析与设计, 与传统概率优化分析方法对比, 说明了非概率方法的合理性及优越性. 总体来看, 非概率优化设计方法尚处于发展阶段, 但由于对概率分布信息的依赖性小, 其发展前景更为广阔.

2.2.4 复合材料结构优化求解算法

无论何种优化策略, 在求解过程中, 合理高效的优化算法至关重要, 尤其是复合材料优化过程中, 针对铺层角度等离散型变量优化, 传统梯度等连续型优化算法并不适用, 数学规划法具有“组合爆炸”的缺陷. 智能优化算法的发展为离散型变量优化提供了新的方法. 目前, 比较常用的优化算法包括遗传算法、粒子群算法、神经网络等. 在复合材料优化问题中引入这些智能算法大大提高了优化精度与效率. Gomes等人^[83]将可靠性指标作为约束, 通过一次二阶矩求解复合材料结构可靠性问题, 结合遗传算法(Genetic Algorithm, GA)及神经网络等智能优化算法完成对层合板结构的优化设计工作, 并取得较好效果; Tang等人^[84]同时考虑了复合材料面内损伤及分层损伤, 结合粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)及有限元算法, 以结构重量最轻为目标, 以铺层厚度及角度为设计变量进行了结构优化分析, 通过算例验证了方法的可行性; 葛锐等人^[85]提出了一种可用于求解非线性约束优化问题的改进粒子群算法, 并将其用于求解复合材料可靠性优化设计. 结果表明, 算法简单易行, 对复合材料优化设计十分有效; 陈建桥课题组^[86,87]以结构厚度最小为目标, 可靠度为约束, 采用遗传算法进行了优化, 并对比分析了遗传算法和传统的基于梯度的优化算法的计算结果, 其有效性得到证实; 李烁等人^[88]用正

交试验设计法选择样本点构建神经网络响应面, 建立优化模型, 应用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)进行优化, 形成一套适用于复杂结构设计的高效优化方法. 以复合材料帽型加筋板的重量优化问题为例, 证明了该方法的优化精度及效率.

2.2.5 复合材料结构优化设计准则

从目前文献中来看, 针对复合材料结构可靠性优化问题, 大部分是基于首层失效理论来建立极限状态方程求解可靠度指标, 并以此为约束进行优化设计. 首层失效理论的主要思想是: 依据单层板失效强度理论, 对层合板结构的每层均进行强度分析, 若某层出现强度破坏, 则认为层合结构整体失效, 此时的可靠性指标为整体结构指标. 这种方法的本质是将层合板结构看作一个由单层板构成的串联系统, 如图1所示. 很明显, 首层失效理论并不符合实际情况, 层合板结构在某层或某几层破坏后, 整个系统并不一定完全失效, 仍具备一定的承载能力, 所以由此提出的终层失效理论更逼近真实情况. 基于此, 逐步失效分析法用来求解终层失效可靠度, 并以此开展复合材料优化设计. 逐步失效分析法的主要思想是: 对层合结构每层进行强度分析, 若破坏则通过刚度降模型降低该层刚度, 再进行强度分析, 直到最终一层破坏, 进而得到结构的失效序列, 再应用系统可靠度求解方法给出整个层合结构的可靠度指标, 其本质是将整个层合结构看作一个单层板组成的并联系统, 如图2所示.

针对该部分内容, 目前一些学者进行了分析研究, 并从定性定量多角度取得了一些成果. 王向阳等人^[89,90]以复合材料层合板为研究对象, 基于终层失效理论采用逐步失效分析法进行可靠性研究, 并结合系统可靠性分析方法获得复合材料层合板的系统可靠性, 与首层失效理论进行了对比研究, 定量地给出了两种失效分析的结构可靠性指标, 并说明了首层失效理论的保守性; 罗成^[91]对复合材料层合板结构的可靠性和基于可靠性的优化设计问题进行了较系统的概括和评述, 建立复合材料层合板的结构可靠性分析模型. 复合材料层合板系统失效概率的计算分别基于首层失效假定和最终层失效假定, 详细对比研究了两种优化准则结果, 并说明了终层失效假定的合理性. Gadade等人^[92]提出了一种基于Puck准则的复合材料层合板结构失效分析, 分别基于首层与终层失效理论

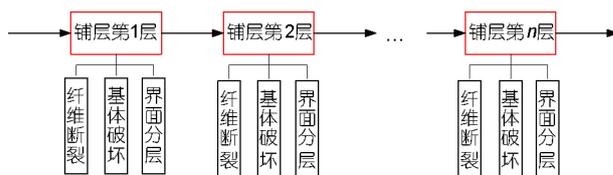


图1 (网络版彩图)首层失效理论示意图
Figure 1 (Color online) The sketch of first layer failure theory.

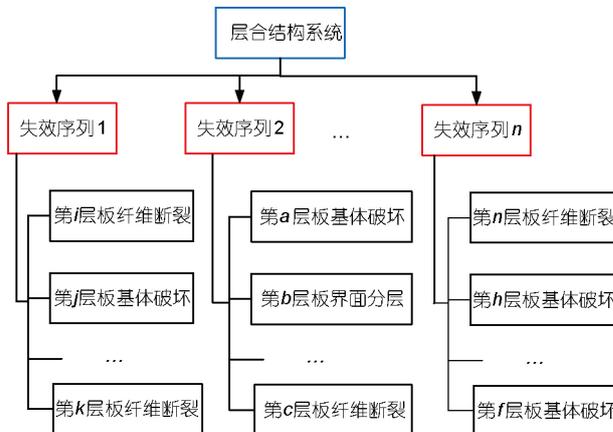


图2 (网络版彩图)终层失效理论示意图
Figure 2 (Color online) The sketch of final layer failure theory.

预测了首层与终层失效载荷, 证明了终层失效分析比首层失效分析更能发挥材料的承载能力, 更加符合工程实际. Kumar等人^[93]、Wang^[94]和Romeo等人^[95]均对终层失效理论进行了深入研究. 通过两种复合材料层合结构的失效分析方法来看, 首层失效分析所得结果过于保守, 但简单易行, 能够得到较优的设计方案; 终层失效分析方法则更接近精确解, 并且能够减少资源浪费, 降低耗费, 但需要对各层进行强度分析及刚度折减, 如果结构复杂, 则计算量难以接受, 所以此方法在工程上难以推广. 总体来看, 基于终层失效理论的复合材料结构可靠性优化设计文献较少, 但从结构精细化设计要求来考虑, 是今后发展的趋势之一.

3 复合材料结构鲁棒优化设计

基于可靠性的复合材料优化设计的目的是在保证结构具有一定可靠性的前提下, 在各变量所组成可行域空间中寻找最优的设计方案, 一般所得到的优化结果位于可行域边缘附近, 此优化方法强调的是最优设计. 而对于有些结构, 在强调最优设计的同时, 还要

求结构的稳定性,也就是说结构的响应对设计变量在一定变化范围内的灵敏度要低,即呈现一种不敏感状态.这在工程中,也是结构设计所要考虑的一个重要指标.鲁棒优化设计的主要思想是:在满足所有约束条件情况下,尽量寻求目标函数值最优,但同时需要满足函数值对变量波动影响最小.通过鲁棒优化设计,实现系统响应的稳健性与可预测性,图3形象地给出了与最优设计的不同.

为了寻求鲁棒优化解,一方面要优化性能函数的均值,另一方面要降低性能函数的方差,因此该优化设计的本质是一个多目标优化问题.如何把一个多目标问题转换为单目标优化问题,目前,比较著名的是日本Taguchi(田口玄一)等人^[96]于1987年提出基于鲁棒的结构稳健性设计田口法,该理论提出后,产生了巨大的经济效益,并获得广泛关注,但需要指出的是该方法只能处理单目标,无约束问题,对于大型复杂系统,实施困难,对于此相关学者也进行了深入的研究,并取得了较为丰富的成果.Sundaresan等人^[97]在优化过程中,引入“敏感系数”从而构造一个新的目标函数,重新优化,以决定鲁棒优化解;Sundaresan等人^[98]对敏感系数进行了改进,引进“权重因子”,通过“权重因子”的取值,来决定新构造的目标函数中原函数和敏感系数的比重;Chen等人^[99]提出了一种协调设计方法,该方法协调了目标函数的均值和标准差在新构造的目标函数中的比重,所求得的鲁棒解分布比较均匀.基于田口法,研究人员对其进行了改进并提出如下优化列式:

$$\begin{aligned} & \text{find } t, \theta, \\ & \min \mu_{f(t, \theta)}, \\ & \quad \sigma_{f(t, \theta)}, \\ & \text{s.t. } g_j(t, \theta) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, l, \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\sigma_{f(t, \theta)} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial f(t, \theta)}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2}$, $x_i \in \{t, \theta\}$, 其他参数已经在前面章节定义过,按上式求出最优均值与方差代入下式求鲁棒解.

$$\begin{aligned} & \min \varphi, \\ & \text{s.t. } \omega_1 \cdot \mu_f / \mu_f^* \leq \varphi, \\ & \quad \omega_2 \cdot \sigma_f / \sigma_f^* \leq \varphi, \end{aligned} \quad (8)$$

μ_f^*, σ_f^* 分别为式(7)得出的均值与方差的最优解, ω_1, ω_2 为设计权重因子,表示均值与方差的鲁棒性特征权重,

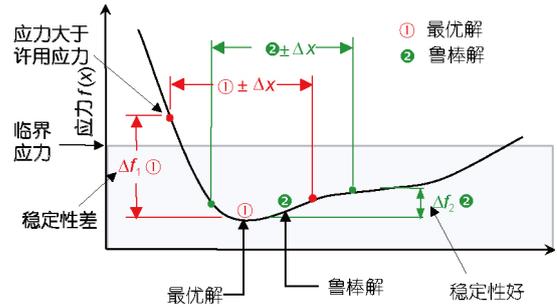


图3 (网络版彩图)鲁棒设计与最优化设计对比示意图
Figure 3 (Color online) The contrast of the robust and optimization design.

$$\omega_1 + \omega_2 = 1.$$

对于复合材料结构的鲁棒优化设计,基于目前文献来看,尚处于初步探索阶段.Gabrel等人^[100]系统地阐述了自2007年以来,鲁棒优化设计在线性、非线性静、动态系统中的分析与应用,并回顾了近十年的发展;Makkapati等人^[101]提出了一套鲁棒优化设计方法,结合神经网络、二次规划法、田口理论及试验设计等方法,通过计算机编程来实现该优化流程的自主分析,并将整套方法应用到复合材料结构优化设计中,取得了理想结果;Henrichsen等人^[102]对含缺陷的复合材料层合结构屈曲鲁棒优化问题做了较为深入的分析,利用递归优化算法解决了外形优化及铺层优化的双重优化问题,在递归优化过程中降低几何缺陷的灵敏度,完成了层合结构的鲁棒优化设计;Phelan等人^[103]创造性地将非概率理论引入到鲁棒优化设计理论中,跳出了概率信息的局限,提出了一种新的混合鲁棒优化及反优化设计技术,以飞行器复合材料机翼为例,对比了此方法及传统优化方法的优化结果,结果表明,在正常工况下,结构有更高的颤振速度;肖志鹏等人^[104]针对气动弹性结构,利用遗传-灵敏度混合算法开展鲁棒优化设计.以大展弦比复合材料机翼的鲁棒气动弹性结构优化设计为例,验证了鲁棒设计方法的适用性和有效性,研究结果表明,考虑鲁棒性约束优化得到的结构较传统优化结构具有更好的抗干扰性;王向阳等人^[105]尝试性地将终层失效理论与鲁棒优化设计方法相结合应用到复合材料结构优化中,以纤维方向角和层合板厚度作为设计变量,最终失效强度为目标,对结构进行优化.在此基础上,考虑了层合板结构的鲁棒优化分析;张志峰等人^[106]针对复合材料格栅加筋圆柱壳,提出了一种含初始缺陷的复合材料格栅加筋圆

柱壳的鲁棒优化设计方法. 鲁棒优化设计所得到的优化分析结果与传统确定性优化方法相比差别较大, 并对壳体的初始缺陷亦将对优化结果产生影响进行了分析. 唐远富^[107]、赵晓芳^[108]在其学位论文中也进行了较为详细的研究.

鲁棒优化设计方法发展已经相当成熟, 并广泛应用于工程中的各个领域, 然而, 从现有的文献来看, 在复合材料优化设计方面, 鲁棒优化设计明显偏少, 其原因可归结于以下两点: (1) 复合材料作为一种新型材料, 由于其自身力学性能的复杂性, 获取结构的精确响应及失效模式异常困难, 对损伤机理认知不明, 难以开展精细化设计; (2) 基于安全系数的传统优化设计方法简便易行, 并不需要对结构的破坏模式、损伤机理做深入研究, 这种基于宏观思想的结构评估方式更容易被工程设计人员接受, 但存在局限性, 前文已经明确指出.

4 复合材料优化设计发展趋势

(1) 复合材料结构非概率可靠性优化设计更加符合优化设计的发展要求. 复合材料可靠性优化相对于传统优化具有的优势已经显而易见. 然而, 大量文献证明, 复合材料结构的可靠性优化设计多集中于以概率统计为基础的前提下进行设计方案的制定, 即需要已知变量的概率分布, 应用传统的可靠性求解方法进行求解, 而针对大型复杂结构而言, 概率信息的缺失明显难以给出可靠性的准确度量, 所以发展基于非概率理论的可靠性优化设计方法是复合材料乃至整个优化设计领域的一个重要发展趋势, 如何以更经济的手段获得能够满足各项约束指标要求的设计方法需求迫切.

(2) 复合材料结构一体化成型技术是未来结构优化设计的关键方向之一. 复合材料损伤演化机理的复杂性、失效模式的多样性、极限状态的强非线性均使得结构安全性能的评估面临巨大困难. 除此之外, 导致复合材料结构破坏的又一重要原因是制造工艺的不确定性, 包括加工误差, 铺层的不均匀性, 导致结构在服役环境中应力分配不均, 出现应力集中现象. 因此, 提高复合材料可靠性优化设计水平的前提是不断改善复合材料结构制造工艺. 目前, 3D打印等材料一体化成型技术可以认为是工艺上的突破性革新, 为

后续复合材料结构优化设计奠定基础.

(3) 高效合理的复合材料结构优化算法的开发亟待解决. 复合材料优化对优化算法要求异常苛刻, 由于优化变量以离散与连续变量混合存在, 传统的连续型优化算法, 例如典型的梯度算法等, 难以解决上述问题, 目前出现的一些智能算法, 为解决该问题提供了一条新途径, 但算法的稳定性、高效性有待提高, 所以针对离散变量优化问题, 开发高效且兼顾精度的全局优化算法迫在眉睫.

(4) 基于终层失效理论的复合材料结构的优化设计准则是结构优化设计发展的必然趋势. 无论是复合材料的力学性能分析还是优化设计, 从现有的文献及研究成果来看, 从首层失效理论的角度出发来分析问题占相当大的比例, 很明显, 这种分析和设计理念并不合理, 复合材料是具有持续承载能力的, 首层失效理论分析过于保守, 使得材料性能不能得以充分发挥, 终层失效理论对复合材料的损伤演化过程的刻画更为接近实际情况, 这里所涉及的强度降及刚度降退化规律成为又一难题. 所以, 复合材料的终层失效理论与可靠性优化设计相结合, 进而实现对复合材料安全性能的精确评估, 将是未来应该关注的重要问题之一.

(5) 考虑复合材料结构多失效模式相关性的综合可靠度优化策略欠缺. 复合材料结构在服役过程中, 所面临的多种不确定因素的影响, 必将导致失效模式的多样化, 而大量文献在研究其可靠度时, 均是基于单一失效模式进行安全性评估, 而忽略了失效模式间的相关性研究, 所以给出的可靠度指标以及优化设计方案并不合理. 目前机构可靠性领域已经逐渐意识到失效模式相关性问题的重要性, 但在复合材料结构设计领域鲜见报道, 所以, 考虑失效模式相关性对于复合材料结构的精细化优化设计是必须解决的问题之一.

(6) 复合材料结构鲁棒优化设计是结构优化发展的一个重要方面. 与传统的优化设计相比, 鲁棒设计能够得到广泛应用的一个重要原因在于优化结果具有更好的稳定性和抗干扰性. 优化结果与最优结果相比较差, 但对于设计变量灵敏度低, 某种程度上来说, 系统的稳定性相对于结构的最优化更加重要, 因此, 将鲁棒优化设计的理念引入复合材料结构领域, 如何建立复合材料结构的鲁棒优化设计模型, 以及与传统优化设计、可靠性优化设计模型的区别, 也是复合材

料结构优化设计的发展方向之一。

5 结论

飞行器的先进性标志之一是结构设计的先进性,

而复合材料为先进飞行器结构的设计提供了重要物质基础和先导技术. 本文系统阐述了复合材料结构的优化设计发展历程以及国内外的研究现状, 并从复合材料结构的设计理念、工艺制造、优化方法、设计准则等方面对发展趋势进行了总结与展望.

参考文献

- 1 Cheng C X, Yan Y. NASA of advanced composite material technology (ACT) study design and the development of textile composites (in Chinese). In: The National Conference on Composite Material. Shanghai, 1998 [成传贤, 燕瑛. 美国宇航局(NASA)的先进复合材料技术(ACT)的研究设计及纺织复合材料的发展. 见: 全国复合材料学术会议. 上海, 1998]
- 2 Wang W, Yang C. Aircraft Composite Wing Surface Structure Optimization Design Theory and Application (in Chinese). Beijing: National Defence Industry Press, 2014. 12–27 [王伟, 杨常. 飞机复合材料翼面结构优化设计理论与应用. 北京: 国防工业出版社, 2014. 12–27]
- 3 Kang E. The Strength Calculation of Plane (in Chinese). Beijing: National Defence Industry Press, 1960. 42–63 [康恩. 飞机强度计算. 北京: 国防工业出版社, 1960. 42–63]
- 4 Wu T M. Determination the safety coefficient of composite material structure (in Chinese). Aeron Sci Tech, 1998. 26–27 [吴铁民. 复合材料结构安全系数的确定. 航空科学技术, 1998. 26–27]
- 5 Yan F F. Performance of Composite Material Dispersion and Safety Coefficient (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. 4–11 [颜芳芳. 复合材料性能的分散性与安全系数. 硕士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2009. 4–11]
- 6 Schmit L A, Miura H. Approximation concepts for efficient structural synthesis. AIAA J, 1976, 12: 8508–8515
- 7 Ashley H. On making things the best-aeronautical uses of optimization. J Aircraft, 1982, 19: 5–28
- 8 Lansing W, Lerner E, Taylor R F. Applications of structural optimization for strength and aeroelastic design requirements. Med Chir Trans, 1978, 6: 221–262
- 9 Akbulut M, Sonmez F O. Design optimization of laminated composites using a new variant of simulated annealing. *Comp Struct*, 2011, 89: 1712–1724
- 10 McDonald M, Mahadevan S. Reliability based design optimization formulations for component and system reliability. In: Proceedings of 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Schaumburg, 2008
- 11 Singha M K, Ramachandra L S, Bandyopadhyay J N. Optimum design of laminated composite plates for maximum thermal buckling loads. J Comp Mater, 2000, 34: 1982–1997
- 12 Irisarri F X, Bassir D H, Carrere N, et al. Multiobjective stacking sequence optimization for laminated composite structures. *Comp Sci Tech*, 2009, 69: 983–990
- 13 Lopez R H, Lemosse D, de Cursi J E S, et al. An approach for the reliability based design optimization of laminated composites. *Eng Optim*, 2011, 43: 1079–1094
- 14 Liu K L, Yao W X, Yu X Q, et al. Safety factor of the composite statistical analysis (in Chinese). J Nanjing Univ Aeron Astron, 2004, 36: 22–28 [刘克龙, 姚卫星, 余雄庆, 等. 复合材料的安全系数统计分析. 南京航空航天大学学报, 2004, 36: 22–28]
- 15 Yang L, Ma Z K, Fu G Z. Safety factor and reliability of composite laminate (in Chinese). Chin J Aeron, 1991, 12: 631–634 [羊玲, 马祖康, 符国政. 复合材料层压板的安全系数与可靠度. 航空学报, 1991, 12: 631–634]
- 16 Mu P G. Ant colony algorithm for composite laminated plate design and optimization (in Chinese). J Mech Strength, 2009, 31: 410–413 [穆朋刚. 蚁群算法在复合材料层合板优化设计中的应用. 机械强度, 2009, 31: 410–413]
- 17 Zhuang S S. An optimization method for aero-engine composite casing based on DSA-FEM (in Chinese). Mech Sci Tech Aerospace Eng, 2012, 31: 1573–1577 [庄三少. 基于DSA-FEM的航空发动机复合材料机匣优化方法. 机械科学与技术, 2012, 31: 1573–1577]
- 18 Zhang Y K, Zhang D. Research on the composite structure optimization procedure (in Chinese). J Solid Rocket Techn, 2003, 26: 69–71 [张彦考, 张铎. 大型复合材料结构优化设计方法研究. 固体火箭技术, 2003, 26: 69–71]
- 19 Wang X Y, Chen J Q, Wei J H. Advances in the reliability-based optimization study for laminated composites (in Chinese). Adv Mech, 2005, 35: 541–548 [王向阳, 陈建桥, 魏俊红. 复合材料层合板的可靠性和优化问题的研究进展. 力学进展, 2005, 35: 541–548]
- 20 Mayer A, Sykes A. A Probability Model for Analysing Complexity Metrics Data. London: Michael Faraday House, 1989. 254–258

- 21 Freudenthal H. Didactical Phenomenology of Mathematical Structures. Netherlands: Springer, 2002
- 22 Kam T Y, Chang E S. Reliability formulation for composite laminates subjected to first-ply failure. *Comp Struct*, 1997, 38: 447–452
- 23 Dey A, Tryon R, Mahadevan S, et al. Fatigue reliability prediction of tapered composites. In: 40th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit. St. Louis, 1999
- 24 Kogiso N, Shao S, Murotsu Y. Reliability analysis of simply supported symmetric laminated plate subject to buckling load. *JSMET*, 1997, 63: 138–145
- 25 Kogiso N, Murotsu Y, Shao S. Effect of correlation on reliability-based design of composite plate for buckling. *AIAA J*, 1998, 36: 1706–1713
- 26 Kogiso N, Murotsu Y, Nakagawa S. Lamination parameters applied to reliability-based in-plane strength design of composites. *AIAA J*, 2003, 41: 2200–2207
- 27 Chen J Q, Xu Y R, Wei J H. Probabilistic optimum design of laminated composites based on the last ply failure criterion (in Chinese). *J Mech Strength*, 2007, 29: 241–246 [陈建桥, 许玉荣, 魏俊红. 复合材料层合板的极限强度分析与可靠性优化设计. *机械强度*, 2007, 29: 241–246]
- 28 An W G, Zhao W T, Yang D H. A method of reliability analysis for composite laminate (in Chinese). *J Astron*, 2005, 26: 672–675 [安伟光, 赵维涛, 杨多和. 复合材料层合板的可靠性分析方法. *宇航学报*, 2005, 26: 672–675]
- 29 Onkar A K, Upadhyay C S, Yadav D. Probabilistic failure of laminated composite plates using the stochastic finite element method. *Compos Struct*, 2007, 77: 79–91
- 30 Venugopal S M. Stochastic Mechanics and Reliability of Composite Laminates Based on Experimental Investigation and Stochastic FEM. Dissertation for Master Degree. Montreal: Concordia University, 2003
- 31 Song Y L, Li S J. The reliability analysis of structure of enhanced fiber composite material plate (in Chinese). *J Harbin Eng Univ*, 1999, 20: 63–71 [宋云连, 李树军. 加强纤维复合材料板结构的可靠性分析. *哈尔滨工程大学学报*, 1999, 20: 63–71]
- 32 Li Y B, Yao W X. Fatigue reliability analysis on structural elements based on SFEM (in Chinese). *J Nanjing Univ Aeron Astron*, 2007, 39: 461–464 [李应波, 姚卫星. 基于SFEM的结构元件疲劳可靠性分析. *南京航空航天大学学报*, 2007, 39: 461–464]
- 33 Chen S X, Hao Z M. Neumann stochastic finite element analysis of the reliability of the composite structure of cyclotron (in Chinese). *J Aeron Mater*, 1998, 18: 47–52 [陈顺祥, 郝志明. 用纽曼随机有限元分析复合材料回旋结构的可靠性. *航空材料学报*, 1998, 18: 47–52]
- 34 Chen X X, Shen Z H, Zhu C Y. Reliability analysis for fiber winding chamber of solid rocket motor via stochastic finite element method (in Chinese). *J Aeron Mater*, 2006, 26: 113–116 [陈顺祥, 沈志辉, 朱成永. 基于SFEM的SRM纤维缠绕结构的可靠性分析. *航空材料学报*, 2006, 26: 113–116]
- 35 Ibnabdeljalil M, Curtin W A. Strength and reliability of notched fiber-reinforced composites. *Acta Mater*, 1997, 45: 3641–3652
- 36 Jeong H K, Sheno R A. Probabilistic strength analysis of rectangular FRP plates using Monte Carlo simulation. *Comp Struct*, 2000, 76: 219–235
- 37 Yao L J, Tong X Y. The reliability analysis of fatigue life of composite laminates (in Chinese). *J Mech Strength*, 1998, 4: 268–270 [姚磊江, 童小燕. 复合材料层合板疲劳寿命的可靠性分析. *机械强度*, 1998, 4: 268–270]
- 38 Hao Z M, Chen S X, Zhang D, et al. The reliability analysis of composite convolution structure by neumann expansion Monte-Carlo β ball method (in Chinese). In: National Conference on Composite Material, Shanghai, 1998 [郝志明, 陈顺祥, 张铎, 等. 分析复合回旋结构可靠性的纽曼展开蒙特卡罗 β 球法. 见: 全国复合材料学术会议. 上海, 1998]
- 39 Ben-Haim Y, Elishakoff I. Discussion on: A non-probabilistic concept of reliability. *Struct Safety*, 1995, 17: 195–199
- 40 Ben-Haim Y. A non-probabilistic concept of reliability. *Struct Safety*, 1994, 14: 227–245
- 41 Ben-Haim Y. A non-probabilistic measure of reliability of linear systems based on expansion of convex models. *Struct Safety*, 1995, 17: 91–109
- 42 Qiu Z P. Convex Method Based on Non-Probabilistic Set-Theory and Its Application (in Chinese). Beijing: National Defence Industry Press, 2005. 11–18 [邱志平. 非概率集合理论凸方法及其应用. 北京: 国防工业出版社, 2005. 11–18]
- 43 Wang X J, Qiu Z P, Wu Z. Non-probabilistic set-based model for structural reliability (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2007, 39: 641–646 [王晓军, 邱志平, 武哲. 结构非概率集合可靠性模型. *力学学报*, 2007, 39: 641–646]
- 44 Gu X D, Wang X J, Qiu Z P. Dynamic response analysis of composite plate with uncertain parameters via interval analysis method (in Chinese). In: The National Conference on Composite Material. Yichang, 2006 [顾笑冬, 王晓军, 邱志平. 具有不确定参数复合材料板动力响应的非概率区间分析法. 见: 全国复合材料学术会议. 宜昌, 2006]
- 45 Guo S X, Zhang L, Li Y. Procedures for computing the non-probabilistic reliability index of uncertain structures (in Chinese). *Chin J Comput Mech*, 2005, 22: 227–231 [郭书祥, 张陵, 李颖. 结构非概率可靠性指标的求解方法. *计算力学学报*, 2005, 22: 227–231]
- 46 Guo S X, Lv Z Z, Feng Y S. Anon-probabilistic model of structural reliability based on interval analysis (in Chinese). *Chin J Comput Mech*, 2001, 18: 56–60 [郭书祥, 吕震宙, 冯元生. 基于区间分析的结构非概率可靠性模型. *计算力学学报*, 2001, 18: 56–60]
- 47 Wang X Y, Chen J Q. Probability and non-probability model of laminated composite plate structures (in Chinese). *Huazhong Univ Sci Tech (Nat Sci Ed)*, 2006, 34: 71–73 [王向阳, 陈建桥. 复合材料层合板结构的概率与非概率模型. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34: 71–73]

- 48 Kang Z, Luo Y. Non-probabilistic reliability-based topology optimization of geometrically nonlinear structures using convex models. *Comp Methods Appl Mech Eng*, 2009, 198: 3228–3238
- 49 Luo Y, Kang Z, Luo Z, et al. Continuum topology optimization with non-probabilistic reliability constraints based on multi-ellipsoid convex model. *Struct Multidisc Opt*, 2009, 39: 297–310
- 50 Jiang C, Zhao M H, Cao W G. Non-probabilistic reliability research on uncertain parameters in rock mechanics. *J Hunan Univ Nat Sci*, 2008, 35: 11–14
- 51 Zhao M H, Jiang C, Cao W G. Non-probabilistic reliability analysis of retaining walls based on interval (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2008, 30: 467–472 [赵明华, 蒋冲, 曹文贵. 基于区间理论的挡土墙稳定性非概率可靠性分析. *岩土工程学报*, 2008, 30: 467–472]
- 52 Li Y L, Wang X J, Huang R. Non-probabilistic reliability analysis of active control system for structural vibration (in Chinese). *J Beijing Univ Aeron Astron*, 2015, 41: 259–266 [李云龙, 王晓军, 黄仁. 结构振动主动控制系统的非概率可靠性分析. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41: 259–266]
- 53 Guo S X, Lv Z Z. Comparison between the non-probabilistic and probabilistic reliability methods for uncertain structure design (in Chinese). *Chin J Applied Mech*, 2003, 20: 107–110 [郭书祥, 吕震宙. 结构的非概率可靠性方法和概率可靠性方法的比较. *应用力学学报*, 2003, 20: 107–110]
- 54 Sun H L, Yao W X. A retrospect for structural reliability measure methods (in Chinese). *Mech Sci Tech Aerospace Eng*, 2007, 26: 140–146 [孙海龙, 姚卫星. 概率体系和非概率体系下结构元件的可靠性分析方法回顾. *机械科学与技术*, 2007, 26: 140–146]
- 55 Kogiso N. Reliability analysis and reliability-based optimization of composite laminated plate subject to buckling. Dissertation for Doctoral Degree. Osaka: Osaka Prefecture University, 1997
- 56 Kogiso N, Katou S, Murotsu Y. Reliability-based optimization of thin composite structure. In: 8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability. South Bend, 2001: 219–222
- 57 Eamon C D, Rais-Rohani M. Integrated reliability and sizing optimization of a large composite structure. *Mar Struct*, 2009, 22: 315–334
- 58 Li W J. Optimal design of composite laminates (in Chinese). *J Northwestern Polytech Univ*, 1986: 35–44 [李为吉. 复合材料层板的优化设计. *西北工业大学学报*, 1986: 35–44]
- 59 Han X, Lei L, Yuan W, et al. Optimization of the composite hat-stiffened panel based on equivalent model (in Chinese). In: 2009 China International Conference on Advanced Materials and Technology. Beijing, 2009 [韩旭, 雷磊, 袁伟, 等. 基于等效模型的帽型复合材料加筋壁板优化设计. 见: 2009暨中国国际先进材料与工艺技术学术研讨会. 北京, 2009]
- 60 Xiu Y S, Cui D G. Ply optimization design for stability of composite laminates (in Chinese). *Eng Mech*, 2005, 22: 212–216 [修英姝, 崔德刚. 复合材料层合板稳定性的铺层优化设计. *工程力学*, 2005, 22: 212–216]
- 61 Chang N, Yang W, Wang W, et al. New method of ply optimization design for stability of composite laminates (in Chinese). *J Mech Strength*, 2008, 30: 148–151 [常楠, 杨伟, 王伟, 等. 基于复合材料层板稳定性的铺层参数优化设计方法. *机械强度*, 2008, 30: 148–151]
- 62 Fang X, Feng Y L, Liu X M, et al. Two level optimization method for large aspect ratio composite wing structure (in Chinese). In: 2015 Aviation Test Technology Proceedings of Academic Exchange. Beijing, 2015 [方雄, 冯玉龙, 刘晓明, 等. 大展弦比复合材料机翼结构的两级优化方法. 见: 2015航空试验测试技术学术交流会议论文集. 北京, 2015]
- 63 Zhang Y K. Composite Wing, Segment Combination Structure Optimization Design (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002. 10–18 [张彦考. 全复合材料弹翼、舱段组合结构优化设计. 硕士学位论文. 西安: 西北工业大学, 2002. 10–18]
- 64 Hou Y P. Composite Laminated Board Spreading Layer Design and Selection and Discrete Optimization Method Research (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. 4–12 [侯玉品. 复合材料层合板铺层设计与离散结构选型优化方法研究. 硕士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2013. 4–12]
- 65 Wang S P, Gao X S, Gan J, et al. Two-level optimization on layout and ply for composite airtight port of airplane (in Chinese). *Chin J Appl Mech*, 2014, 3: 24–29 [王帅培, 高行山, 甘建, 等. 飞机复合材料气密舱门布局和铺层的两级优化设计. *应用力学学报*, 2014, 3: 24–29]
- 66 Wang P Y, Dong Y P, Wang F S, et al. District and level optimization method for a high aspect-ratio composite wing (in Chinese). In: Composite Materials: Innovation and Sustainable Development. Changsha, 2010 [王佩艳, 董勇鹏, 王富生, 等. 大展弦比复合材料机翼分区分级优化. 见: *复合材料: 创新与可持续发展*. 长沙, 2010]
- 67 Tang J, Zhang M Q. Research on small-sample fuzzy reliability simulation based on bayes Monte Carlo Method. *J Syst Simul*, 2009, 21: 7557–7559, 7563
- 68 Ding F, Yin J C, Dang J Q. Reliability assessment of the small sample aero-engine bearings. *Adv Mater Res*, 2014, 986–987: 858–861
- 69 Zou X, Yao R. Small sample statistical theory and IC reliability assessment. *Control Deci*, 2008, 23: 241–232
- 70 Xiong J, Shenoi R A, Gao Z. Small sample theory for reliability design. *J Strain Anal Eng Des*, 2002, 37: 87–92

- 71 Fu H. Method for reliability assessment with very small sample. *J Mech Strength*, 2005, 3: 12
- 72 Jin B, Qin D T, Hu J J. A bayes method of reliability synthesis evaluation based on the small sample-system. *J Chongqing Univ*, 2007, 9: 4
- 73 Kang Z, Bai S. Structural optimization considering uncertainties and multi-field coupling (in Chinese). *Sci Techn Innov Herald*, 2016, 13: 177–178 [亢战, 白嵩. 考虑不确定性与多场耦合的结构优化. *科技创新导报*, 2016, 13: 177–178]
- 74 Wang X J, Wang L, Qiu Z P. Response analysis based on smallest interval set of parameters for structures with uncertainty (in Chinese). *Appl Math Mech*, 2012, 33: 1078–1090 [王晓军, 王磊, 邱志平. 基于最小参数区间集的不确定结构响应分析. *应用数学和力学*, 2012, 33: 1078–1090]
- 75 Wang X J, Yang H F, Qiu Z P, et al. Fuzzy theory for uncertain structural analysis based on measurement data (in Chinese). *J Beijing Univ Aeron Astron*, 2010, 36: 887–891 [王晓军, 杨海峰, 邱志平, 等. 基于测量数据的不确定性结构分析的模糊理论. *北京航空航天大学学报*, 2010, 36: 887–891]
- 76 Luo Y, Li A, Kang Z. Reliability-based design optimization of adhesive bonded steel-concrete composite beams with probabilistic and non-probabilistic uncertainties. *Eng Struct*, 2011, 33: 2110–2119
- 77 Kang Z, Luo Y J. On structural optimization for non-probabilistic reliability based on convex models (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2006, 38: 807–815 [亢战, 罗阳军. 基于凸模型的结构非概率可靠性优化. *力学学报*, 2006, 38: 807–815]
- 78 Kang Z, Luo Y, Li A. On non-probabilistic reliability-based design optimization of structures with uncertain-but-bounded parameters. *Struct Safety*, 2011, 33: 196–205
- 79 Chen L, Qiu Z P. Natural frequency analysis and optimization of composite laminates based on the non-probabilistic approach (in Chinese). In: *The National Conference on Composite Material*. Harbin, 2009 [陈亮, 邱志平. 复合材料板固有频率的非概率分析及优化. 见: 全国复合材料学术会议. 哈尔滨, 2009]
- 80 Xu M H, Qiu Z. Interval analysis and optimization for free vibration of all-composite lattice truss core sandwich beam (in Chinese). *J Beijing Univ Aeron Astron*, 2013, 39: 1079–1085 [许孟辉, 邱志平. 复合材料点阵夹芯梁振动特性区间分析与优化. *北京航空航天大学学报*, 2013, 39: 1079–1085]
- 81 Wang X J, Wang L, Jia X, et al. Structural optimization design based on non-probabilistic convex modeling reliability (in Chinese). *J Beijing Univ Aeron Astron*, 2012, 38: 630–635 [王晓军, 王磊, 贾晓, 等. 基于非概率凸模型可靠性的结构优化设计. *北京航空航天大学学报*, 2012, 38: 630–635]
- 82 Wang C, Qiu Z P, Wang X J. Composite structure-acoustic coupling interval reliability optimization (in Chinese). In: *The Chinese Mechanical Conference*. Xi'an, 2013 [王冲, 邱志平, 王晓军. 复合材料结构-声耦合系统区间可靠性优化. 见: 中国力学大会. 西安, 2013]
- 83 Gomes H M, Awruch A M, Lopes P A M. Reliability based optimization of laminated composite structures using genetic algorithms and artificial neural networks. *Struct Safety*, 2011, 33: 186–195
- 84 Tang Y, Chen J, Peng W. Probabilistic optimization of laminated composites considering both ply failure and delamination based on PSO and FEM. *Tsinghua Sci Tech*, 2009, 14: 89–93
- 85 Ge R, Chen J Q. Reliability optimal design of composite materials based on the improved particle swarm optimization algorithm (in Chinese). *Mech Sci Tech*, 2007, 26: 257–260 [葛锐, 陈建桥, 魏俊红. 基于改进粒子群优化算法的复合材料可靠性优化设计. *机械科学与技术*, 2007, 26: 257–260]
- 86 Xu Y R, Chen J Q, Luo C, et al. Probabilistic optimum design of laminated plates based on genetic algorithms (in Chinese). *Mech Sci Tech*, 2004, 23: 1344–1347 [许玉荣, 陈建桥, 罗成, 等. 复合材料层合板基于遗传算法的可靠性优化设计. *机械科学与技术*, 2004, 23: 1344–1347]
- 87 Wang X Y, Chen J Q, Luo C. Optimum design of the probability for composite laminates based on genetic algorithm (in Chinese). *Huazhong Univ Sci Tech (Nat Sci Ed)*, 2004, 32: 10–12 [王向阳, 陈建桥, 罗成. 基于遗传算法的层合板结构的可靠性优化设计. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32: 10–12]
- 88 Li S, Xun Y M, Zhang J. Composite structural optimization design based on neural net work response surfaces (in Chinese). *Acta Mater Comp Sin*, 2005, 22: 134–140 [李烁, 徐元铭, 张俊. 基于神经网络响应面的复合材料结构优化设计. *复合材料学报*, 2005, 22: 134–140]
- 89 Wang X Y. Study on the Reliability-Based Optimum Design and the Robust Optimization for Laminated Composite Structures (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Huazhong University of Science and Technology, 2004 [王向阳. 复合材料层合板结构的可靠性优化和鲁棒优化研究. 博士学位论文. 华中科技大学, 2004]
- 90 Wang X Y, Chen J Q, Zhang X D. Probabilistic progressive failure analysis of CFRP laminated plates (in Chinese). *J Wuhan Univ Tech (Transport Sci Eng)*, 2004, 28: 863–865 [王向阳, 陈建桥, 张谢东. 纤维增强复合材料层合板的概率逐步失效分析. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2004, 28: 863–865]
- 91 Luo C. Reliability and Optimal Design of Fiber Composites Based on Ultimate Strength (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003 [罗成. 纤维复合材料基于最终强度的可靠性及其优化设计. 硕士学位论文. 武汉:

华中科技大学, 2003]

- 92 Gadade A M, Lal A, Singh B N. Finite element implementation of Puck's failure criterion for failure analysis of laminated plate subjected to biaxial loadings. *Aerospace Sci Tech*, 2016, 55: 227–241
- 93 Kumar A, Chakrabarti A. Failure analysis of laminated composite skew laminates. *Procedia Eng*, 2017, 173: 1560–1566
- 94 Wang X. Reliability-based optimum study on FRP laminated plates with genetic algorithm. In: *Proceedings of International Symposium on Distributed Computing and Applications To Business, Engineering and Science*. Bangalore, 2007
- 95 Romeo G, Danzi F, Cestino E, et al. Optimization of advanced composite wing box structures subjected to combined loads and impact. In: *Proceedings of 1st International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization*. Kos, 2014
- 96 Taguchi G, Cariapa V. Taguchi on robust technology development. *J Pressure Vessel Technol*, 1993, 115: 336
- 97 Sundaresan S, Ishii K, Houser D R. A robust optimization procedure with variations on design variables and constraints. *Eng Opt*, 1995, 24: 101–117
- 98 Sundaresan S, Ishii K, Houser R. Automatic differentiation in robust optimization. *AIAA J*, 1997, 35: 1072–1079
- 99 Chen W, Wiecek M M, Zhang J. Quality utility—A compromise programming approach to robust design. *J Mech Des*, 1999, 121: 179
- 100 Gabrel V, Murat C, Thiele A. Recent advances in robust optimization: An overview. *Eur J Oper Res*, 2014, 235: 471–483
- 101 Makkapati S. Robust Design Optimization with Applications to Composite-Material Structures. Dissertation for Doctoral Degree. Morgantown: West Virginia University, 1997
- 102 Henrichsen S R, Lindgaard E, Lund E. Robust buckling optimization of laminated composite structures using discrete material optimization considering “worst” shape imperfections. *Thin-Walled Struct*, 2015, 94: 624–635
- 103 Phelan S L, Mavris D N. Robust design of aeroelastically tailored composite plates using a new formulation of anti-optimization and optimization. In: *56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. Kissimmee, 2015
- 104 Xiao Z P, Wan Z Q, Yang C, et al. Robust aeroelastic optimization design of a composite wing (in Chinese). *Acta Mater Comp Sin*, 2010, 27: 127–132 [肖志鹏, 万志强, 杨超, 等. 复合材料机翼鲁棒气动弹性优化设计. *复合材料学报*, 2010, 27: 127–132]
- 105 Wang X Y, Chen J Q. Robust design of laminated composite plates based on the last-ply failure criterion (in Chinese). *J Mech Strength*, 2004, 26: 675–679 [王向阳, 陈建桥. 基于最终失效强度的层合板结构的鲁棒优化分析. *机械强度*, 2004, 26: 675–679]
- 106 Zhang Z F, Chen H R, Bai R X. Robust optimization of advanced grid composite cylindrical shell considering initial imperfect effect (in Chinese). *Acta Mech Solid Sin*, 2006, 27: 58–64 [张志峰, 陈浩然, 白瑞祥. 含初始缺陷复合材料格栅加筋圆柱壳的鲁棒优化设计. *固体力学学报*, 2006, 27: 58–64]
- 107 Tang Y F. Robust reliability analysis and optimization algorithms for composite structure (in Chinese). Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. 10–18 [唐远富. 复合材料结构可靠性鲁棒分析及优化算法研究. 武汉: 华中科技大学, 2012. 10–18]
- 108 Zhao X F. Considering Load Uncertainty and Stiffness Uncertainty of Robust Optimization Problem (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. 4–12 [赵晓芳. 考虑载荷不确定性和刚度不确定性的鲁棒优化问题. 硕士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2015. 4–12]

Advances in the optimization design study for aircraft composite structure

WANG XiaoJun^{*}, MA YuJia, WANG Lei & QIU ZhiPing

School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China

With the increasing requirements of aircraft design, the service condition becomes more and more harsh, development for new material is imminent, and composite material has been widely used in the design and manufacture in the modern aircraft structure by virtue of high specific strength, high specific stiffness, fatigue resistance, and corrosion resistance. The advantage to be designed of composite material provides designers with more broad space for development of its potential abilities; therefore, the optimal design of the composite material gradually is aroused heated discussion among researchers both domestic and abroad. On the issue that optimization theory for composite materials at domestic and abroad, in this paper, the author introduce the development process of composite structure optimization design, and systematically reviews the achievements that researchers have obtained currently. The main contents include the safety factor-based design optimization, reliability-based design optimization and robust optimization design, elaborate the application of the above methods in composite structure optimization design region, discuss the relations among the three optimization design theories, and then the current structure optimization design of the composites presented some problems and the future development direction is analyzed.

composite structure, aircraft, reliability optimization, safety factor, robust optimization

PACS: 46.05.+b, 72.80.Tm, 42.15.Eq

doi: [10.1360/SSPMA2017-00043](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00043)