第 35 卷 第 4 期 力 学 进 展 Vol.35 No.4
2005 年 11 月 25 日 ADVANCES IN MECHANICS Nov.25, 2005

复合材料层合板的可靠性和优化问题的研究进展*

王向阳 [1,2,†] 陈建桥 [2] 魏俊红 [2]
[1] 武汉理工大学交通学院，武汉 430063
[2] 华中科技大学力学系，武汉 430074

摘 要 纤维增强复合材料是由高强度、低密度的纤维材料与基体组成，具有很多其它材料所不具有的特性，其应用范围越来越大．复合材料的机械性能与加工制造等过程密切相关，其材料性能的离散度较大，因此考虑不确定性因素的结构可靠性分析非常必要．可设计性是复合材料的另一个特点，因此复合材料结构的优化设计也是研究的热点之一．本文讨论了复合材料层合板结构的可靠性分析方法，优化设计，可靠性优化设计以及鲁棒优化等，并对其发展趋势作出展望．

关键词 复合材料层合板，可靠性，优化设计，鲁棒设计

1 引 言

纤维复合材料由基体和增强材料组成, 比强度和比模量比传统材料高，是一种先进复合材料，广泛应用于航空、航天、造船、汽车等领域，具有很高的实际应用价值.

纤维复合材料具有可设计性. 可以通过改变组分材料的种类、含量、以及铺层方向和顺序，使之满足结构设计的要求, 这在通常金属材料的结构设计中是很难办到的. 纤维增强复合材料的可设计性，为实现复合材料的优化设计, 以及达到复合材料的有效利用提供了非常大的可能性. 同时，也留下了如何准确评价复合材料可靠性的问题. 当复合材料运用于对结构重量比较敏感的高科技领域时, 如何在保证结构强度和可靠度的基础上，节省材料，降低结构重量，是目前研究的一个重要方向.

2 结构可靠性研究

20 世纪 40 年代，工程技术人员已经认识到，在产品的安全分析与设计中必须考虑不确定因素的可靠性模型. 经过半个多世纪的发展，可靠性分析已成为产品效能的决定因素之一, 作为一个与国民经济和国防科技密切相关的学科，它在过去的 50 多年中也受到了充分的重视, 它在未来的科技发展中也必将得到更加广泛的研究 [1~6].

自然界中存在两种不同的不确定现象: 随机性和模糊性. 随机现象是由于难以全部估计的多种偶然因素存在，通常无法事先准确断定未来事件的结果，也即由于因果关系的不充分，在一定条件下，某些结果并不满足 “必然如此”. 考虑这种不确定性因素的安全分析模型称之为随机可靠性模型，它开始于 20 世纪 40 年代，至今已发展得较为成熟；而考虑模糊性这种不确定因素的可靠性模型则是 20 世纪 70 年代末发展起来的, 模糊性是不同于随机性的一种不确定因素, 它主要是由于不可能给某些事物以确定的定义和评定标准而形成的, 模糊可靠性模型是当今可靠性学科研究的焦点. 随机可靠性模型与模糊可靠性模型都是从概率的角度来度量结构的安全程度 [3].

2.1 随机可靠性分析

随机可靠性模型的出现主要是由于许多按常规安全系数法设计的结构在其寿命期内发生了破坏，这些破坏发生的根源在于载荷、材料参数以及几何参数等基本变量具有随机性. 军用航空工业首先对结构可靠性分析发生兴趣 [7], Freudenthal[2] 于 1947 年为土木工程结构正式引进了可靠性分析方法. 其

收稿日期: 2004-07-14, 修回日期: 2004-12-27
* 国家自然科学基金 (10272049) 资助项目
† E-mail: wangxy2003@163.com

后，结构可靠性分析的数学理论有了很大发展，并在很多领域，例如土木工程、桥梁结构和海洋工程等作为改进设计或修订规范的理论依据.

复合材料由于有许多优点，如比强度和比模量高，可设计性好，使其在近几十年内广泛地应用于航空、航天和潜艇等设计要求比较严格的结构上，同时也使这些结构的性能得到了极大的改善和提高. 一般来说，这些结构都工作在比较特殊而且要求严格的环境下，从安全角度考虑，结构需要有较高的可靠度. 而且由于复合材料机械性能与加工制造等过程密切相关，其离散度要比金属材料大. 此外，复合材料的各向异性特点使其对载荷、边界条件、环境变动等相当敏感. 因此，考虑复合材料结构的可靠性设计问题显得尤其重要，也是一个比较新的有待于进一步研究的课题 [8~32].

复合材料可靠性的计算方法有多种，比较常用的有一次二阶矩方法 [8~11], 这里的 "一次" 指的是分析中将结构功能函数或极限状态方程展开为一次函数，" 二阶矩" 指的是分析中使用了随机变量的前二阶矩，即平均值和方差. 该方法应用相当广泛，已成为国际上结构可靠度分析和计算的基本方法 [8]. 其要点是非正态随机变量当量正态化以及非线性功能函数的线性化. 由于将非线性功能函数作了线性化处理，所以该方法是一种近似的计算方法，但具有很强的实用性，计算精度能够满足工程需求. 被工程界广泛使用的中心点法和验算点法 (JC 法) 等都是该方法的具体体现. Liu 和 Mahadevan [9] 采用一次二阶矩方法分析了层合板结构的可靠度，文章中每个单层板考虑 3 种不同的失效模式：基体破坏、纤维断裂、层间破坏，分别采用不同的功能函数来评价，通过一次二阶矩方法分别计算每个单层的失效概率，系统失效概率的计算基于最终层失效假定.

蒙特卡洛法 (Monte Carlo method) 是结构可靠度分析的另一种基本方法，其基本原理是对随机变量进行大量抽样，结构失效次数占抽样总数的比率即为其失效概率. 由于具有相对精确的特点，除用于复杂结构的可靠度分析外，也常用于各种可靠度近似方法分析精度的校核. 蒙特卡洛法的模拟数目一般相当大，需要占用大量的计算时间，因此，对该方法的运用有一定的局限性. 对于失效概率非常小的问题，该方法缺乏实用性. Jeong 和 Shen[12] 利用蒙特卡洛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，文中采用横向分布载荷，材料参数，强度参数作为随机变量，服从正态或威布尔分布，采用不同的失效准则作为极限状态方程分别计算，并对比分析各种不同极限状态方程求得的结果.

还有其他一些计算方法，如随机有限元法，它是在有限元计算中引入不确定性因素而形成，随机有限元与可靠度计算相结合是目前人们不断探讨的课题，对于解决复杂结构可靠性问题，非常有效. Lin 和 Kam [13] 采用随机有限元法对复合材料层合板在横向载荷作用时的情况作了概率失效分析，文中基本随机变量的统计参数通过实验得到，利用随机有限元法计算应力，采用不同的失效准则作为极限状态方程，分别计算系统的首层失效载荷，并进行了对比和讨论. 另外， Murotsu[14] 利用多点检验法 (multiple-check point) 确定多向纤维复合材料的破坏概率，文中把材料参数、强度参数作为基本随机变量，利用 Tsai-Wu 准则作为每一铺层的极限状态方程，采用串联系统假定.

复合材料结构针对不同的载荷类型，其可靠性研究也有许多成果发表 [15~18]. Zhao 和 Gao[15] 通过列举重要失效模式来评价结构的可靠性，考虑 3 种不同的载荷情况：面内拉载荷、剪切荷载、及一般面内荷载作用. Philippidis 和 Lekou[16] 则考虑面内载荷作用，其强度服从两参数威布尔分布，在计算时，首先要把随机变量转化为标准正态分布. Gurvich 和 Pipes[17] 采用多步失效法 (multi-step failure) 分析了复合材料梁在弯曲荷载作用下的失效概率，其可靠性分析采用蒙特卡洛法；Jeon 和 Shenoi[18] 则研究了层合板在横向分布载荷作用下的可靠性，分布载荷、强度参数和材料参数作为随机变量， Tsai-Hill 准则作为极限状态方程，采用直接公式法 (direct simulation method) 进行结构的可靠性分析.

以上的研究，都是关于复合材料层合板在结构完整的情况下的可靠性分析. 当层合板结构中存在裂纹、初始挠度、小孔等缺陷时，结构的承载能力将会受到很大的影响，目前也有这方面的研究 [19~22]. Kogiso[19] 考虑层合板结构的微小初始缺陷 (initial imperfection) 引起一个初始挠度，研究存在初始挠度的情况下结构的可靠性分析. 把初始挠度、强度参数以及材料参数作为随机变量，采用一次二阶矩法分析了简支对称层合板在首层失效条件下的可靠性.

在复合材料层合板结构的研究中，对于层合板系统的失效，有两种不同的假定：即首层失效假定 (first-ply failure assumption 或 weakest-link hypothesis) 和最终层失效假定 (last-ply failure assumption).

首层失效假定 (图 1) 认为层合板系统是由各单层板串联组成，单层板中任何一层的失效都被看作为系统的失效. 当层合板结构被用作密封性要求较高的压力容器时，这种假定比较适合. Kam 和 Chang[23] 利用首层失效假定和结构可靠性原理对复合材料层合板的可靠性作了理论分析，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. 目前关于复合材料层合板结构的可靠性分析，大多是基于首层失效假定的.

最终层失效假定 (图 2) 认为层合板结构系统是由各单层板并联组成，结构中的某一单层失效后，剩余结构仍然具有一定的承载能力，并没有马上破坏，因此应力在结构中重新分布，然后又有新的单层破坏，如此反复，直到结构最终破坏. 在基于最终层失效假定的复合材料结构的可靠性分析中，由于涉及大量的失效模式，以及各失效模式之间的相关性等问题，使得结构系统的可靠性分析难度很大，目前关于这方面的研究较少.

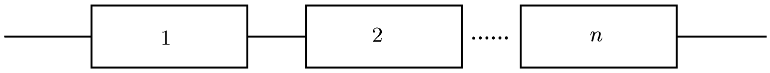

图 1 串联系统

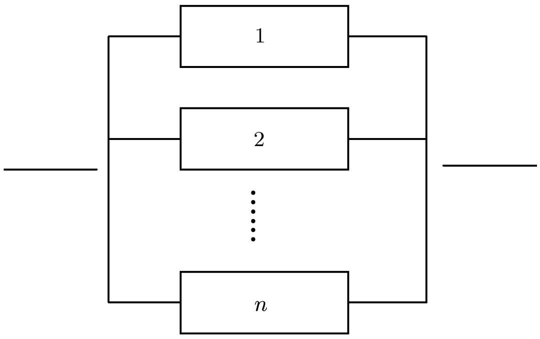

图 2 并联系统

Gurvich 和 Pipes[24] 采用了一种多步失效方法分析了层合板结构的可靠性，假定结构中基体的功能只是保持结构的完整性，而载荷完全由纤维承担，每个单层板中只有当纤维失效后，才算失效，由此建立一个层合板结构的多步失效分析法；而 Zhao 和 Gao[15] 提出了一种重要失效模式 (significant failure modes) 来评价层合板结构的可靠性，文中首先提出了最小失效载荷 (minimum failure load, ML) 和临界失效载荷 (critical failure load,CL) 的概念，然后根据每个单层板的 ML 和 CL 比较，列举出结构的重要失效模式，由重要失效模式对层合板结构进行可靠性评价； Liu 和 Mahadevan[10,11] 提出了一种新颖的概率失效序列来分析复合材料层合板的最终失效概率，把每个单层板分为基体破坏和纤维断裂两种失效模式，每个失效模式遵守不同的极限状态方程，当某种失效发生时，去掉结构中相应的刚度，然后应力重新分布，直到结构全部破坏，求出结构的失效序列后，通过重要失效序列来分析结构系统的失效概率. 陈建桥等 [21,22] 在其文章中发展了一种存在初始缺陷的层合板结构基于最终层失效假定的结构系统的可靠性分析方法. 基于最终层失效分析时结构每个单层板的可靠性分析比较容易，而由单层板的可靠性求得系统的可靠性，文章 [10, 21] 建立了一种概率逐步失效序列来求解，这为充分考虑结构系统的可靠性提供了可能.

综观现有文献已经取得的研究成果，可以看出，复合材料层合板的可靠性分析计算比较复杂，目前一般采用一次二阶矩的方法，它原理简单，所需要的计算时间较少，且精度满足设计要求. 分析的对象多限于完整结构，且基于首层失效假定. 而对于存在各种缺陷的层合板结构，特别是基于最终层失效假定时的复合材料层合板的可靠性分析，还有很多工作需要进行.

2.2 模糊可靠性分析

随机可靠性理论是基于两个基本假设：

(1) 概率假设. 系统失效行为可以完全在概率范畴内得以刻化.

(2) 二态假设. 系统只有两类状态，要么完全正常，要么完全失效.

而实际上，这种界限必然是模糊的，即 “结构安全” 这一事件本身不可能有一刀切的确定性的定义和评判标准. 结构安全这一事件的模糊性有两个来源：一是结构安全准则的模糊性；二是结构受干扰所可能具有的模糊性. 因此再引入两个新的假设 [33]:

(1) 可能性假设. 系统的失效行为可以完全在可能性测度的基础上进行刻化.

(2) 模糊状态假设. 系统的正常工作状态和失效状态用模糊状态来进行描述.

在 (1) 和 (2) 假设基础上就形成了模糊可靠性的理论 [34].

在 20 世纪 80 年代初期就有人用模糊数学方法处理可靠性设计中存在的模糊性问题，自 20 世纪 80 年代中期以后，国内外有关人士就探索如何将模糊数学应用于可靠性分析问题，进行了大量工作. 目前的主要成果有：

(1) 较系统和客观地阐述了建立模糊可靠性设计理论的必然性. 文献 [35] 讨论了随机可靠性存在的

不足，并讨论了模糊可靠性理论的产生、发展及应用前景.

(2) 建立了模糊可靠性的主要指标，并分析了模糊可靠度的计算方法. 通过将随机可靠性的主要指标，如可靠度、失效概率、故障率、平均寿命等的延伸和扩展，建立了相应的模糊可靠度、模糊失效概率等概念. 文献 [36] 对模糊可靠度的模型，及各种情况下的模糊可靠度的计算及其仿真做了介绍，文献 [37] 提出了一种模糊可靠度的数值算法.

(3) 对系统的模糊可靠性分析. 利用上述建立的模糊可靠性的概念和模糊可靠性指标的计算方法，对系统的模糊可靠性分析进行了大量的研究. 文献 [38] 讨论了用区间数来进行模糊系统可靠性分析的方法，文献 [39] 讨论了用模糊数算子分析模糊系统可靠性的方法.

我们知道复合材料的强度行为受其组分材料、界面性质、层合结构、载荷、环境等多种因素的影响，并含有多种不确定因素，并且材料强度的分布数据是通过大量的试验得到的，这些数据的分散性很大，影响因素很多，其观测又是小子样的，因此复合材料强度包含大量的模糊信息. 复合材料所承受的载荷有一定的变化范围，结构材料参数、尺寸参数也有分散性，所以工作应力是在一定范围内连续变化的. 由于受客观条件的限制，我们难以精确定量化. 因此在复合材料的可靠性设计中，如果考虑应力、强度或者失效状态的模糊性，结果会更加接近实际. 对复合材料结构的随机可靠性已经有许多学者进行了研究，但是对于其模糊可靠性的研究很少. 魏俊红和陈建桥 [40] 利用 Monte Carlo 随机模拟的方法分析了复合材料层合板的模糊可靠度，计算中考虑了强度的模糊性，并提出了复合材料模糊可靠度的分析和计算模型，对复合材料的模糊可靠性研究做了尝试，结果和随机可靠性模型作了对比分析. 对于状态的模糊性，准则的模糊性以及一些人为判断等的影响的分析还有待于进一步的研究.

通过对现有文献的了解，可以看到，复合材料结构的模糊可靠性分析，目前很少有人涉及，尚待进一步研究.

3 可靠性优化分析

纤维增强树脂基复合材料应用于航空航天结构时，当材料选定后，在不增加结构重量和满足强度要求的情况下，如何减轻结构的重量是设计者关心的首要问题. 由于复合材料结构的铺层纤维角及铺层顺序的可设计性，所以给解决上述问题带来了有效的途径. 其中，复合材料层合板结构的常规优化设计是最重要的研究内容之一 [41]. 目前，已有许多这方面的成果 [42～51].

Kam[42] 采用两层优化技术对复合材料夹心板的方向角和厚度进行优化，作者提出了一种多起点全局优化方法. Riche 和 Haftka[43] 采用遗传算法进行了复合材料层合板的铺层顺序优化，使结构获得最大临界屈曲载荷，在使用遗传算法时，采用不同的遗传因子对结构分别进行计算，并作了分析对比. Singha[44] 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 4 节点板单元的有限元法分析了层合板的热屈曲问题.

由于结构系统可靠性设计技术的发展，以及结构系统在工程上应用的实践，使人们感到基于可靠性的结构优化设计较传统的结构优化设计更为合理. 常规的优化设计是以定值作为设计变量，没有确切地考虑载荷及元件强度实际存在的不确定性，仅以一个笼统的安全系数来描述客观存在的各种随机性. 可靠性优化则采用随机变量，能更好地反映结构的安全程度. 另外，通过常规优化设计所得的结构接近于满应力解，其破坏概率比未经优化的结构要大得多. 可靠性优化设计是以满足结构可靠度指标为约束，故能保证满足可靠性指标要求，而且经优化后各元件尺寸的分布更为合理.

在基于可靠性的结构优化设计中，把结构的可靠度要求或者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，通过调整元件参数使结构的重量或费用最小；或者在一定的结构重量或费用条件下，通过调整元件参数使结构系统的可靠度最大. 由于对结构物的最主要的要求是既安全可靠又经济合理，而这样两类结构优化问题可明显地提高设计质量和获得明显的经济效益，故这种基于可靠性的结构优化设计成为目前国内外都在积极探索和研究的重要课题 [52].

由于结构系统可靠性分析涉及到大量的失效模式以及失效模式相关性等问题，使得可靠性的计算非常困难和复杂，也给基于可靠性的结构优化设计带来了难度. 在纤维增强复合材料的结构可靠性优化设计方面，目前研究较少 [53～59]，仍处于发展的初期阶段. 这也是复合材料结构优化设计技术今后的重点发展方向之一.

羊妗等 [53] 采用多级优化技术提出了复合材料结构可靠性优化设计方法，以结构重量最小为目标，采用传统的基于梯度的优化算法. Shao 和 Miki[54,55] 则提出了多轴层合板的可靠性优化问题，可靠性分析

时，采用首层失效假定，以载荷和强度参数作为随机变量，Tsai-Wu 准则为极限状态方程，计算方法采用一次二阶矩法，优化设计时，以方向角为设计变量，可靠性为约束．Mahadevan 和 Liu[56] 也提出了一种可靠性优化设计方法，它基于首层失效假定，采用了两步优化的方法，首先做无约束优化，得到最优方向角，然后再优化单层厚度，最后得到方向角和厚度的最优解．

目前对于复合材料层合板结构可靠性优化设计的研究主要基于首层失效假定，设计变量一般为一个．而对于可靠性计算时基于最终层失效假定，设计变量超过一个以上的问题，目前很少涉及．其主要的原因在于，传统的基于梯度法的优化设计，在迭代收敛的过程中，必须求得目标函数或约束函数关于设计变量的导数，而基于最终层失效假定的复合材料层合板结构的可靠性优化设计，可靠度一般是包含在目标函数或约束函数中，可靠度对于设计变量的导数很难求得，因此，寻求新的优化算法尤其重要．

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化搜索算法 [60,61]．它最早由美国密执安大学的 Holland 教授提出 [62]，20 世纪 70 年代 De Jong 基于遗传算法的思想在计算机上进行了大量的纯数值函数优化计算试验 [63]．20 世纪 80 年代由 Goldberg 进行归纳总结，形成遗传算法的基本框架 [64]．

遗传算法直接以目标函数值作为搜索信息，基本上不用搜索空间的知识或导数等其他辅助信息，而仅用适应度函数值来评价个体，并且进行遗传操作．而且遗传算法的适应度函数不仅不受到连续可微的约束，而且其定义域可以任意设定．因而适用于大规模，高度非线性的不连续多峰函数的优化以及无解析表达式的目标函数的优化 [65]．陈建桥等 [66,67] 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．这对于复合材料结构可靠性优化研究是一种新的尝试，其有效性得到证实．当然结构可靠性优化分析的难点在于可靠性分析时基于最终层失效假定，文献 [66, 67] 中可靠性分析主要是基于首层失效假定，当求解了每个单层板的可靠性后，如何建立系统的可靠性，即如何求得基于最终层失效假定的结构可靠性优化分析，目前还没有文献介绍．

4 鲁棒优化研究

鲁棒设计方法由日本田口玄一博士于 1987 年提出后，立即在工程领域得到关注和推广，产生了巨大的经济效益，是产品质量设计的又一次飞跃．通过鲁棒设计能使产品的性能对生产和服务期间构件变异的敏感性降低，所以产品在生命周期内，其构件发生老化仍能正常工作 [68]．

传统的优化设计就是寻求满足约束条件和使目标函数最小时的设计变量，即寻求设计变量的最优解 μ_{opt}．鲁棒设计的思想是：一方面使目标函数尽可能达到最优，另一方面使目标函数值相对影响参数的敏感度尽可能小．见图 3，x 是某一设计变量，Δx 是其变动范围，$y(x)$ 是系统响应．在最优解 μ_{opt} 附近变动 Δx，响应从 y_L 变动到 y_H，而在鲁棒解 μ_{rob} 附近变动 Δx，响应几乎没有变化，很稳定．传统的优化设计是寻求最优解 μ_{opt}，而鲁棒设计对应的目标值比优化解可能略差，但相对稳定得多，系统响应具有稳定性和可预测性．鲁棒优化设计的思想目前在机械设计和结构设计领域有一定的研究 [69~72]．

为了寻求鲁棒优化解，一方面要优化行为函数的均值，一方面要降低行为函数的方差，因此归根到底是一个多目标优化问题．如何把一个多目标优化问题变为单目标非线性优化问题，目前有几种方法，比较有名的如田口方法 [69]，通过降低行为函数的“信噪比”，来达到鲁棒优化的目的．但是该方法有许多缺陷，只能处理单目标、不包括约束的问题，对于大型复杂工程系统，试验设计次数太大，实施有困难．Sundaresanl[70] 在优化过程中，引入“敏感系数 SI”从而构造一个新的目标函数，重新优化，以决定鲁棒优化解．Su 和 Renaud[71] 则对敏感系数进行了改进，引进“权重因子 α”，通过 α 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[72] 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偏差在新构造的目标函数中的比重，所求得的鲁棒优化解分布比较均匀．

复合材料的鲁棒优化设计是指针对影响因素的变动，如纤维方向角或单层板厚度的微小制造误差，其强度行为在一个不大的范围内变动，具有预期的稳定性．强度鲁棒性好，则其综合可靠性高，在这个意义下，对应的材料 / 结构设计才是最佳的．陈建桥等 [73~75] 通过试验与数值计算，分析了复合材料层合板的强度鲁棒性特征．文献 [76, 77] 对层合板可靠性优化结果进行了鲁棒性讨论，Wang 等 [78] 则采用有限元方法分析了层合板结构的强度鲁棒性．

综合国内外文献，鲁棒优化问题研究是一个刚起步的新领域，而对于复合材料层合板结构的鲁棒优化问题，目前基本没有研究者介入，更是一个全新的领域．

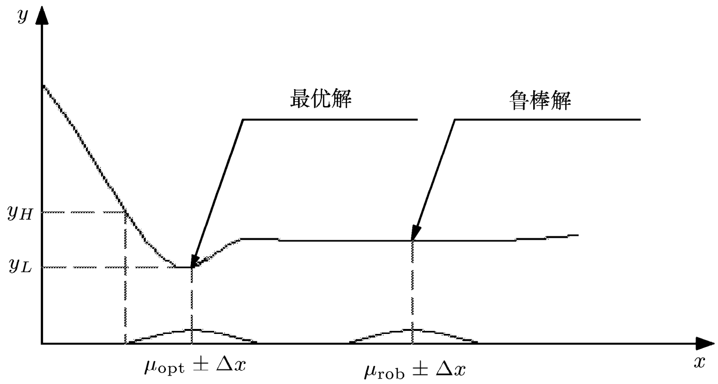

图 3 鲁棒解和最优解的对比

5 复合材料结构可靠性与优化问题研究的发展趋势

(1) 复合材料层合板结构的随机可靠性分析非常重要，特别是基于最终层失效理论的可靠性分析，将是一个重要的发展方向．但是由于可靠性分析时涉及大量的失效模式，以及各失效模式之间的相关性问题，给基于最终层失效理论的可靠性分析带来困难，这就需要采用一些较好的方法来处理复杂结构系统的可靠性分析问题．

(2) 由于复合材料结构的强度和载荷中诸多因数的模糊性，考虑结构的模糊可靠性分析非常有意义．建立结构的模糊可靠性模型，分析其与随机可靠性模型的区别、联系．

(3) 考虑复合材料结构的可靠性优化分析是结构优化设计的一个重要趋势．由于可靠性分析的困难，以及系统可靠性计算时的复杂性，我们很难求得可靠性对于各设计变量的导数，这使得采用传统的基于梯度的优化算法计算可靠性优化比较困难，从而也需要寻求新的优化算法解决复合材料结构的可靠性优化问题，把遗传算法等新的优化算法运用于结构的可靠性优化分析，特别是基于最终层失效理论的可靠性优化研究，目前开展很少．

(4) 相对于传统的优化设计，鲁棒设计的结果具有更好的稳定性和抗干扰性．把鲁棒设计的概念引入复合材料结构领域，是一个创举．相对于优化设计模型，鲁棒设计的优化目标可能略差，但是对于各种设计变量的微小偏差，其目标函数更加稳定．如何建立复合材料结构的鲁棒设计模型，以及它与传统优化设计、可靠性优化设计模型的比较，也是复合材料结构研究的一个方向．

参 考 文 献

1 王兴业．复合材料力学分析与设计．北京：国防科技大学出版社，1999．22～29

2 Freudenthal A M. Safety of structures. *Trans ASCE*, 1947, 112: 125～180

3 吕震宙，冯蕴雯．结构可靠性问题研究的若干进展．力学进展，2000, 30(1): 21～28

4 赵国藩，金伟良，贡金鑫．结构可靠度理论．北京：中国建筑工业出版社， 2000．12～18

5 Yakov Ben H. A non-probabilistic concept of reliability. *Structural Safety*, 1994, 14: 227～245

6 郚文蛟．不完整结构的可靠性分析．北京：国防工业出版社，1997．23～27

7 Faulkner D. Reliability of offshore structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1984, 3: 28～42

8 朱殿芳，陈建康，郭志学．结构可靠度分析方法综述． 中国农村水利水电, 2002, 8: 47～49

9 Liu X, Mahadevan S. Ultimate strength failure probability estimation of composite structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2000, 19: 403～426

10 Cederbram G, Elishakoff L, Librescu L. Reliability of laminated plates via the first-order second-moment method. *Composite Structure*, 1990, 15: 161～ 167

11 Mahadevan S, Liu X, Xiao Q. A probabilistic progressive failure model of composite laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1997, 16: 1020～1038

12 Jeong H K, Shenoi R A. Probabilistic strength analysis of rectangular FRP plates using Monte Carlo simulation. *Computers and Structures*, 2000, 76: 219～235

13 Lin S C, Kam T Y. Probabilistic failure analysis of transversely loaded laminated composite plates using first-order second moment method. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126: 812～820

14 Murotsu Y, Miki M, Shao S. Reliability design of fiber reinforced composites. *Structural Safety*, 1994, 15(1-2): 35～49

15 Zhao H, Gao Z. Reliability analysis of composite laminate by enumerating significant failure modes. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1995, 14: 427～444

16 Philippidis T P, Lekou D J. Probabilistic failure prediction for FRP composites. *Composites Science and Technology*, 1998, 58: 1973～1982

17 Gurvich M R, Pipes R B. Probabilistic analysis of multi-step failure process of a laminated composite in bending. *Composite Science and Technology*, 1995, 55: 413～421

18 Jeong H K, Shenoi R A. Reliability analysis of mid-plane symmetric laminated plates using direct simulation method. *Composite Structures*, 1998, 43: 1～13

19 Kogiso N, Shao S, Murotsu Y. Reliability analysis of simply supported symmetric laminated plate subject to buckling Load. *Trans JSME*, 1997, 63: 138～145

20 Kogiso N, Murotsu Y. Reliability analysis of Laminated composite plate with initial imperfection. *Trans JSME*, 2000, 66: 1483～1490
21 Chen J Q, Wang X Y, Luo C. Reliability analysis of FRP laminated plates with consideration of both initial imperfection and failure sequence, *ACTA Mechanica Solida Sinica*, 2002, 15(3): 227～235
22 Chen J Q, Wang X Y, Luo C. Reliability analysis of FRP laminated plates with initial imperfection. In: AMSE in Fatigue, Fracture, and Damage Analysis, ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Vancouver, 2002. New York: McMillan, 2002, 443(2): 1～9
23 Kam T Y, Chang E S. Reliability formulation for composite laminates subjected to first-ply failure. *Composite Structures*, 1997, 38: 447～452
24 Gurvich M R, Pipes R B. Probabilistic strength analysis of four directional laminated composites. *Composite Science and Technology*, 199, 56: 649～656
25 Goda K, Phoenix S L. Reliability approach to the tensile strength of unidirectional CFRP composites by Monte-Carlo simulation in a shear-lag model. *Composites Science and Technology*, 1994, 50: 457～468
26 Kam T Y, Lin S C, Hsiao K M. Reliability analysis of nonlinear laminated composite plate structures. *Composite Structures*, 1993, 25: 35～49
27 Thomas D J, Wetherhold R C. Reliability analysis of composite laminates with load sharing. *Journal of Composite Materials*, 1991, 25: 1459～1475
28 Engelstad S P, Reddy J N. Probabilistic nonlinear finite element analysis of composite structures. *AIAA Journal*, 1992, 31: 362～369
29 Lin S C. Reliability predictions of laminated composite plates with random system parameters. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2000, 15: 327～338
30 Gurvich M R, Pipes R B. Reliability of composite in a random stress state. *Composites Science and Technology*, 1998, 58: 871～881
31 Miki M, Murotsu Y. Reliability of unidirectional fibrous composites. *AIAA Journal,* 1990, 28: 1980～1986
32 Yushanov S P, Bogdanovich A E. Analytical probabilistic modeling of initial failure and reliability of laminated composite structures. *International Journal of Solids Structures*, 1998, 35: 665～685
33 Cai K Y. Fuzzy states as a basis for a theory of fuzzy reliability. *Fuzzy Reliability*, 1993, 33(4): 2253～2263
34 Cai K Y. Fuzzy variables as a basis for a theory of fuzzy reliability in the possibility context. *Fuzzy Sets and Systems*, 1991, 54(2): 145～172
35 黄洪钟. 对常规可靠性理论的批判性评述 —— 兼论模糊可靠性理论的产生、发展及应用前景. 机械设计， 1994, (3): 1～5
36 董玉革. 机械模糊可靠性设计. 北京：机械工业出版社， 2001. 22～29
37 Jiang Q, Chen C. A numerical algorithm of fuzzy reliability. *Reliability Engineering and System Safety*, 2003, 6(3): 299～307
38 Cheng C H, Mon D L. Fuzzy system reliability analysis by confidence interval. *Fuzzy Sets and Systems*, 1993, 56: 51～55
39 Chen S M. Fuzzy system reliability analysis using fuzzy number arithmetic operations. *Fuzzy Sets and Systems*, 1994, 64: 31～38
40 Wei J H, Chen J Q. Fuzzy reliability of laminated composites. In: International Conference on Heterogeneous Material Mechanics, Chongqing, 2004. Chongqing: Chongqing University Press, 2004. 91～94
41 温卫东，徐惠珍，顾玉明，郝勇. 纤维增强树脂基复合材料结构的优化设计. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(4): 436～446
42 Kam T Y, Lai F M, Chao T M. Optimum design of laminated composite foam-filled sandwich plates subjected to strength constraint. *International Journal of Solids and Structures*, 1999, 36: 2865～2889
43 Riche R, Haftka R T. Optimization of laminate stacking sequence for buckling load maximization by genetic algorithm. *AIAA Journal* , 1993, 31: 951～956
44 Singha M K, Ramachandra L S, Bandyopadhyay J N. Optimum design of laminated composite plates for maximum thermal buckling loads. *Journal of Composite Materials,* 2000, 34: 1982～1997
45 Fukunaga H, Vanderplaats G N. Optimum design of laminated composite structures. *Composite Materials Design and Analysis*, 1990, 45(3): 493～507
46 Kam T Y, Snyman J A. Optimal design of laminated composite plates using a global optimization technique. *Composite Structures*, 1991, 19: 351～370
47 Mckernan S J. An-isotropic tensile probabilistic failure criterion for composites: [dissertation]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1990. 10～29
48 Munjal A K. Optimization of design allowable for composite structures. *SAMPE Quarterly*, 1987, 18: 18～27
49 Miki M, Murotsu Y, Tanaka T. Optimum fiber angle of unidirectional composites for load with variations. *AIAA Journal,* 1990, 28: 1333～1339
50 Park W J. An optimal design of simple symmetric laminates under the first ply failure criterion. *Journal of Composite Materials,* 1982, 16: 341～355
51 Mesquita L, Kamat M P. Structural optimization for control of stiffened laminated composite structures. *Journal of Sound and Vibration*, 1987, 116: 33～48
52 安伟光. 结构系统可靠性和基于可靠性的优化设计. 北京：国防工业出版社， 1997. 13～18
53 羊妗，马祖康，庄力舟. 采用多级优化技术进行复合材料结构可靠性优化设计. 航空学报， 1993, 14(8): 408～411
54 Shao S, Miki M, Murotsu Y. Optimum fiber orientation angle of multi-axially laminated composites based on reliability. *AIAA Journal*, 1993, 31: 919～920
55 Miki M. Reliability-based optimization of fibrous laminated composites. *Reliability Engineering and System Safety*, 1997, 56: 285～290
56 Mahadevan S, Liu X. Probabilistic optimum design of composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 1998, 32: 68～82
57 Richard F, Perreux D. A reliability method for optimization of $[+\theta, -\theta]n$ fiber reinforced composite pipes. *Reliability Engineering and System Safety*, 2000, 68: 53～59
58 Kogiso N, Shao S, Murotsu Y. Reliability-based optimum design of a symmetric laminated plate subject to bucking. *Structural Optimization*, 1997, 14: 184～192
59 Yang L, Ma Z K. Optimum design based on reliability for composite laminate layup. *Computers and Structures,* 1989, 31: 327～383
60 周明，孙树栋. 遗传算法原理及应用. 北京：国防工业出版社， 1999. 22～49
61 王小平，曹立明. 遗传算法 - 理论、应用与软件实现. 西安：西安交通大学出版社， 2002. 12～15
62 Holland J H. Adaptation in Nature and Artifical Systems. Massachusettes: MIT Press, 1992. 22～40
63 De J K. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems: [dissertation]. Michigan: University of

Michigan, 1975. 76~91
64 Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Massachusettes: Addison-Wesley Publishing Company, 1989. 22~25
65 唐文艳, 顾元宪. 遗传算法在结构优化中的研究进展. 力学进展, 2002, 32(1): 26~40
66 王向阳, 陈建桥, 罗成. 基于遗传算法的复合材料层合板的可靠性优化设计. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2004, 1: 15~23
67 许玉荣, 陈建桥. 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, 20(1): 23~ 26
68 周继胜, 张圣坤. 结构鲁棒设计方法及其应用. 力学与实践, 2000, 22(1): 11~15
69 Shoemaker A C, Tsui K L, Wu J. Economical experimentation methods for robust design. *Technometrics*, 1991, 33: 415~427
70 Sundaresan S. A robust optimization procedure with variations on design variables and constrains. *J Mechanical Design*, 1993, 115: 379~386
71 Su J, Renaud J E. Automatic differentiation in robust optimization. *AIAA Journal,* 1997, 35(6): 1072~1079
72 Chen W. Quality utility- a compromise programming approach to robust design. *J. Mechanical Design*, 1999, 121: 178~187
73 陈建桥, 李峰. 复合材料层合板的强度鲁棒性特征. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2003, 31(1): 111~113
74 Nagata M, Takezono S, Chen J Q. The effect of loading direction and/or stacking sequence on the strength in quasi-isotropic CFRP laminates. *Mater Sci Res Inter*, 2003, 45(2): 131~137
75 Nagata M, Takezono S, Chen J Q. The influence of loading direction on the compressive strength of CFRP laminates. *Technometrics*, 2003, 45(5): 137~144
76 Chen J Q, Luo C, Wang X Y. Reliability-based optimization and its robustness for angle-ply laminates. In: Proceedings of IMMM, Wuhan, 2003. Beijing: Tsinghua University Press & Springer-Verlag. 2003. 99~103
77 罗成, 王向阳, 陈建桥, 斜交层合板的可靠性分析与最优结构的鲁棒性. 华中科技大学学报 (城市建设版), 2003, 20(1): 26~29
78 Wang X Y, Chen J Q. Robust design of laminated composite plates. In: International Conference on Heterogeneous Material Mechanics, Chongqing, 2004. Chongqing: Chongqing University Press, 2004. 10~14

ADVANCES IN THE RELIABILITY-BASED OPTIMIZATION STUDY FOR LAMINATED COMPOSITES*

WANG Xiangyang[1,2,†] CHEN Jianqiao[2] WEI Junhong[2]

[1]School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China
[2]Department of Mechanics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China

Abstract Made of high strength-low density fibers and a matrix, the fibrous composite enjoys many excellent properties or special characteristics and finds wide applications. The mechanical properties of composite materials are correlated with the manufacturing process, and their diversity is generally larger than that of metals, so the reliability analysis is important. Designability is another feature of composites, which makes it possible to optimize a composite structure. This paper discusses the reliability, optimum design, reliability-based optimization and robust optimization for laminated composites, and some suggestions are made for future research.

Keywords laminated composite, reliability, optimum design, robust design

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10272049)
† E-mail: wangxy2003@163.com