

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.09.015

国产碳纤维缠绕复合材料轴类构件可靠性设计

周冲,王丹勇,陈以蔚,李树虎,魏化震,王荣惠,张春杰

(中国兵器工业集团第五三研究所,济南 250031)

摘要: 使用可靠性随机分析理论与确定性有限元求解技术,建立了一种适合于国产碳纤维缠绕复合材料传动轴构件设计研发的可靠性分析方法。使用该方法,能够有效计算国产碳纤维复合材料轴类构件使用过程可靠性指标以及失效概率,通过对结构响应变量起主要影响作用的随机输入变量分析,确定影响构件质量的主要因素,预测出构件在工作过程中的失效件数,从而给出制备工艺是否需要继续提升的判断依据,为把关构件的合格率提供了理论保障。

关键词: 复合材料;传动轴;可靠性;有限元;蒙特卡洛法

中图分类号: TB330.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2013)09-0068-05

Reliability Design for Drive Shafts Made of Domestic Carbon Fiber Filament-wound Composite

Zhou Chong, Wang Danyong, Chen Yiwei, Li Shuhu, Wei Huazhen, Wang Ronghui, Zhang Chunjie

(Institute 53 of CNGC, Jinan 250031, China)

Abstract: The method of reliability analysis for designing drive shafts made of domestic carbon fiber filament-wound composites was presented by combining the reliability stochastic analysis theory and determinacy finite element method. The reliability analysis was an effective method for calculating the reliability and failure probability of the shafts made of domestic carbon fiber composites. By analyzing the random input variables which played major roles in response variables of structure, the main factors which influencing the quality of the shafts could be determined and the failure parts of the shafts in the process of working was predicted. Thereby the judgement for whether the preparation process technology being needed to continue to improve was given, which provided a theoretic ensurance for controlling the qualification rate of the shafts.

Keywords: composite; drive shaft; reliability; finite element; Monte-Carlo method

由于碳纤维缠绕复合材料具有良好的抗振、抗疲劳等优异特性,在连接轴零部件设计中得到广泛应用。众多研究人员发现,将制备轴类构件的金属材料替换为碳纤维缠绕复合材料,可在总体结构自重得到大幅减轻的同时,降低噪声,减少传动系统能量损失,并提高其抗振性能。

目前,随着国内生产技术的不断提高,国内相继建成了一些能年产过百吨甚至千吨的碳纤维生产基地,大量国产碳纤维将用于制备复合材料轴类等构件。然而由于国产碳纤维在材料性能、质量一致性、工艺性能等方面与进口碳纤维相比仍存在一定差距,并且其材料自身力学性能离散性非常大,常规设计方法已不再适用于国产碳纤维增强复合材料构件的开发。而基于概率理论和数理统计的可靠性分析设计是研究系统特性的一种新型设计方法,可用于国产碳纤维增强复合材料构件可靠性的研究。

在可靠性理论不断发展的基础上,可靠性概

率设计在国内外已经有了许多新的研究成果和实际应用。美国 NASA 在 20 世纪 60 年代中期便提出机械部件应使用强度干涉模型进行可靠性概率设计^[1]; Liu Peiling 等^[2]将可靠性指标的 Racwitz Fisseler 迭代算法与随机有限元法相结合,计算了构件结构的可靠度; K.Bae 等^[3]研究了弹性模量、厚度及载荷为不确定参数的平面可靠性拓扑优化问题; H.S.Jung 等^[4]研究了三维几何非线性结构的可靠性拓扑优化问题; 陈亮^[5]建立了适合工程应用的板壳有限元一阶摄动随机有限元的可靠度方法; 刘李^[6]结合可靠性分析方法和理论,对起重机金属结构的安全性进行了可靠性评价。到目前为止,世界各国也相继成立了应用概率分析法进行产品可靠性研究的专门机构。1974 年美国和日本成立了使用结构可靠性分析方法研究产品安全指标的专门机

联系人: 周冲,助理工程师,硕士,主要从事复合材料设计及性能研究

收稿日期: 2013-07-10

构,随后澳大利亚、瑞典航空研究院的一些学者也成立专门机构对结构可靠性问题进入深入研究^[7]。

传动轴是复合材料的一个重要应用方面,目前复合材料传动轴在航天飞机^[8]、高性能汽车^[9-10]、赛车以及特殊用途的机械^[11]中得到了较多应用。由于复合材料轴类构件承载工况往往比较复杂,其结构设计的合理性将直接影响整个轴类构件的使用性能要求。

鉴于上述原因,笔者使用可靠性随机分析理论与确定性有限元求解技术,建立一种适合于国产复合材料轴类构件设计研发的可靠性分析方法。

1 分析方法

1.1 设计参数的离散处理

根据实际工程中的不确定因素,有限元分析中任何一个输入、输出变量都使用离散处理。

以某种概率密度分布函数对不确定性参数进行描述,零件的加工误差或几何尺寸等符合正态分布,材料弹性模量数值大致服从高斯分布,施加的载荷服从正态分布,经过大量的采样点分析统计出系统响应参数的影响关系、影响程度和分布特性等。

1.2 蒙特卡洛模拟法抽样

在目前的结构可靠度计算中,蒙特卡洛模拟法被认为是一种最常用的方法,可以直接用于模拟各种工程的真实过程以及零件在现实中的任何行为。与直接抽样法相比,该方法中的拉丁超立方抽样技术计算效率更高,其抽样“记忆”功能,可避免因直接抽样法数据点集中而引起的仿真循环重复问题。因此,笔者使用蒙特卡洛模拟法中拉丁超立方抽样进行可靠性分析。

2 国产碳纤维缠绕复合材料轴类构件的可靠性设计

笔者通过对一种典型碳纤维缠绕复合材料轴类构件概率设计,建立一种适用于国产碳纤维缠绕复合材料轴类构件的可靠性概率设计方法及设计流程,解决国产碳纤维缠绕复合材料力学性能离散性大导致其连接件工程实际使用安全性低、设计不完善等影响产业化应用关键问题,为国产碳纤维增强复合材料安全可靠应用提供技术基础。

2.1 一种典型复合材料轴类构件

一种典型复合材料轴类构件如图1所示^[12-14]。典型复合材料轴类构件三维实体简化几何模型如图2所示。由于模型的复合材料铺层的叠合顺序、几何形状和载荷是对称的,笔者取其局部结构进行求

解。建立的有限元分析模型如图3所示。

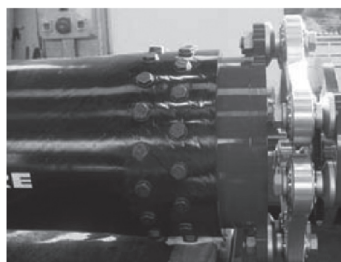


图1 一种典型复合材料轴类构件

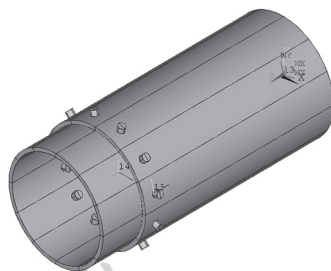


图2 三维实体简化几何模型

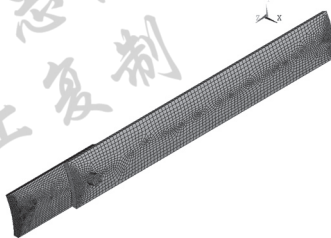


图3 有限元分析模型图

碳纤维增强复合材料轴类构件包括复合材料、金属法兰以及螺栓,有限元分析中,复合材料使用SOLID46单元,金属法兰以及螺栓采用SOLID45单元。单向复合材料力学性能常数取自试验均值,试验做出的单向复合材料5个试样拉伸强度值为1.78,1.45,0.984,1.30和1.37 GPa,可以看出,其拉伸强度值分散极大。

2.2 安全系数的确定

复合材料轴类构件安全系数按式(1)进行确定。

$$n = \frac{S_x}{\sigma_x} \geq 1 \quad (1)$$

式中: n ——安全系数;

S_x ——复合材料纤维方向最大应力;

σ_x ——单向复合材料纵向拉伸强度。

2.3 复合材料失效准则的选取

复合材料的失效因子^[15]如式(2)和式(3)所示。

$$F = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{li}}{X_i}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{li}}{S_c}\right)^2} \quad (2)$$

$$F \leq 1, \text{未失效}; F > 1, \text{失效} \quad (3)$$

式中: σ_{li}, τ_{li} ——荷载作用下复合材料第*i*层纤维方

向应力和面内剪切应力;

X_i ——复合材料纵向拉伸强度;

S_c ——复合材料剪切强度。

2.4 随机输入变量与随机输出变量

随机输入变量与随机输出变量定义如下: 复合材料轴内径 COMPISITE_NR、外径 COMPISITE_WR、轴长 COMPISITE_LENGTH; 复合材料纵向、横向、法向及 3 个方向剪切弹性模量分别为 COMPISITE_EX, COMPISITE_EY, COMPISITE_EZ, COMPOSITE_GXY, COMPOSITE_GXZ, COMPOSITE_GYZ; 复合材料三个主方向泊松比分别为 COMPOSITE_PRXY, COMPOSITE_PRXZ, COMPOSITE_PRYZ; 复合材料拉伸强度 COMPOSITE_STRENGTH; 复合材料的剪切强度 COMPOSITE_SHEAR; 均布载荷 PRESSURE。

随机输出变量为复合材料最大失效因子 MAX_SFCTOR。

2.5 模拟次数的确定

应用蒙特卡洛法进行构件可靠度分析, 设抽样次数为 200。

图 4 和图 5 分别为对随机输入变量经过 200 次抽样后分析出的随机输出变量的样本标准差历史和样本均值历史。

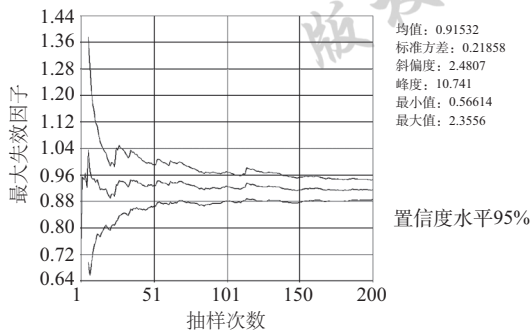


图 4 MAX_SFCTOR 样本标准差历史

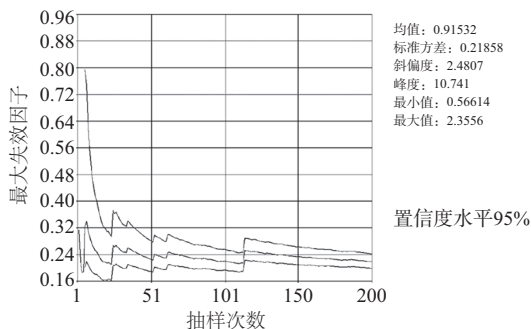


图 5 MAX_SFCTOR 样本均值历史

从图 4、图 5 可以看出, 在置信度水平为 0.95 内, MAX_SFCTOR 的样本标准差历史和样本均值历

史都逐渐稳定收敛, 曲线趋向水平, 说明本次计算模拟次数满足要求, 可以反映样本空间的特征, 得出满足设计精度要求的结果。

2.6 输出变量的概率分布

图 6 与表 1 分别为随机输出变量最大失效因子 MAX_SFCTOR 的概率分布和参数特征。

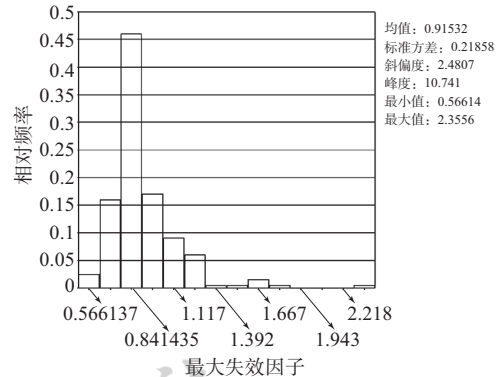


图 6 MAX_SFCTOR 概率分布图

表 1 最大失效因子输出参数的参数特征

均值	标准方差	斜偏度	峰度	最小值	最大值
0.91532	0.21858	2.4807	10.741	0.56614	2.3556

由图 6 可知, 输出变量最大失效因子 MAX_SFCTOR 基本上为正态分布形式。

随机输出变量 MAX_SFCTOR 的累积分布函数如图 7 所示。从中可以判断构件的可靠性或失效概率。累积分布函数在任一点的数值等于数据出现在该点之下的概率值。

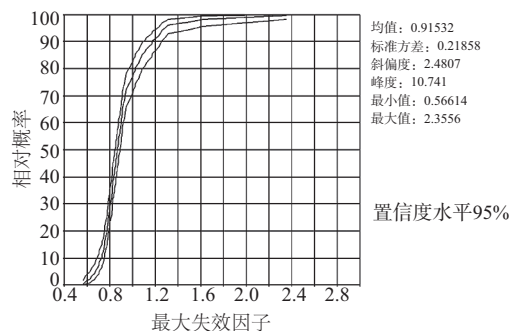


图 7 MAX_SFCTOR 的累积分布函数

在实际工程中, 用本次工艺制备复合材料连接轴构件, 若生产 1000 件, 质量能满足用户要求的合格品数量按以下方法计算。

由表 1 输出的参数特征可知, 输出变量 MAX_SFCTOR 基本上为正态分布形式, 其最大值为 2.3556; 最小值为 0.56614; 标准方差为 0.21858。由图 7 可知, 在置信度为 95% 时结构的可靠性为 $p=76.92\%$, 即结构最大失效因子小于 1 的概率为合格品。

将每生产一件构件看作是一次试验, 并假设各

次试验是独立事件,生产 1 000 件构件中的合格品为 X ,则 X 是一个随机变量,且有 $X \sim (1000, 76.92\%)$,服从二项分布,设合格品最大数量为 x ,则利用棣莫弗-拉普拉斯定理求解合格品数量 $x=815$,即 1 000 件产品中有 815 件为合格品。

图 8 为变量灵敏度分析结果。其中,相对影响不大的因素是指随机输入变量对输出变量影响水平在 2.5% 以下的因素;有显著影响的因素指影响水平在 2.5% 以上的因素。

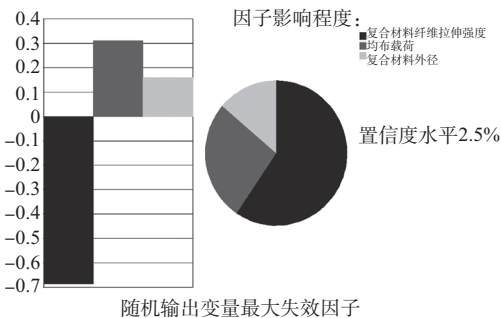


图 8 灵敏度分析示意图

分析图 8,复合材料外径 COMPOSITE_WR,均布载荷 PRESSURE 与复合材料构件最大失效因子 MAX_SFCTOR 是正相关。复合材料纤维拉伸强度 COMPOSITE_STRENGTH 与复合材料构件最大失效因子 MAX_SFCTOR 是负相关。

设计参数对复合材料轴类构件最大失效因子影响程度的排序为:COMPOSITE_STRENGTH>PRESSURE>COMPOSITE_WR。

由以上可以看出,复合材料纤维方向拉伸强度的分散程度对构件最大失效因子的变化趋势有很强的影响,相关性大。由此得知,应以降低单向复合材料拉伸强度的离散度为目标来改进复合材料工艺制备技术,提升工艺制备稳定性水平,由此才能大幅提高构件合格率。另外均布载荷和复合材料外径对最大失效因子的变化趋势也有较强的影响,应控制构件适用环境以及制造过程构件尺寸公差。

2.7 不同安全系数对可靠性设计的影响

安全系数是工程结构设计方法中用以反映结构安全程度的系数。安全系数越高,结构稳定性和可靠性越好,但往往设计的结构自重变大。针对复合材料构件特点,采取不同设计安全系数探讨其对复合材料构件稳定性以及可靠性的影响,计算结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出,设计安全系数分别为 1.3,1.5 和 2.0 时,假设总共生产 1 000 件构件,利用棣莫弗-

表 2 不同安全系数下构件合格率及失效件计算结果

构件总数 / 件	设计安全系数	构件合格率 / %	合格品总数 / 件	失效件总数 / 件
1 000	1.3	76.92	815	185
1 000	1.5	88.70	921	79
1 000	2.0	97.35	991	9

拉普拉斯定理求解合格品数量。构件相应合格率分别为 76.92%,88.70% 和 97.35%,合格品数分别为 815,921 及 991 件。构件合格率以及合格品总数随着设计安全系数的提高而提高,结构稳定性和可靠性相对要好,但结构自重大幅增加,使用 2.0 安全系数设计时,产品不合格数仍有 9 件,说明目前使用的复合材料制备工艺相对不可靠。

2.8 提高制备工艺稳定性后构件可靠性预测

以上构件失效概率过大,主要是由于构件制备工艺稳定性不好,导致材料拉伸强度离散性过高。在此为提高构件稳定性和可靠性,如果改进制备工艺(如采用纤维增强复合材料湿法缠绕成型工艺,优化树脂体系工艺浸润性,实现缠绕树脂含量均匀一致性和性能稳定,提高纤维的增强效果),能相应地将单向复合材料拉伸强度提升到 1.30 GPa 以上,拉伸强度离散度也会相应降低。假设离散后复合材料构件的拉伸强度均值由 1 376.8 MPa 提高到均值 1 440 MPa(试样拉伸强度最低值由 0.984 GPa 提升至 1.30 GPa),变异系数(标准方差)由 0.21 降低为 0.079,即说明拉伸强度离散性大大降低。以降低拉伸强度离散度为目标来改进制备工艺,改进前后输出参数的参数特征对比如表 3 所示。

表 3 最大失效因子输出参数的参数特征

种类	均值	标准方差	最小值	最大值
原始工艺	0.915 32	0.218 58	0.566 14	2.355 6
改进工艺	0.856 71	0.099 3	0.651 44	1.188 2

由表 3 数据可以看到,改进制备工艺前后,输出参数 MAX_SFCTOR 的标准方差、最大值以及最小值都呈明显下降趋势,即说明随着制备工艺的改进,构件的稳定性及可靠性大大提高。

工艺制备改进后构件合格率及失效件分析如表 4 所示。由表 4 可知,同样生产 1 000 件构件,随着制备工艺的改进,在设计安全系数为 1.3 时,合格品的总数由 815 件提高到 951 件,构件的合格率由 76.92% 提高到 92.23%,构件的稳定性及可靠性大大提高。在设计安全系数 2.0 下,构件合格率为 100%,说明以降低拉伸强度离散度为目标而改进制备工艺水平对提高产品的稳定性和可靠性具有十分重要的作用。

表4 制备工艺改进后1000件构件合格率及失效件分析

种类	设计安全系数	构件合格率/%	合格品总数/件	失效件总数/件
原始工艺	1.3	76.92	815	185
改进工艺	1.3	92.23	951	49
原始工艺	1.5	88.70	921	79
改进工艺	1.5	98.50	998	2
原始工艺	2.0	97.35	991	9
改进工艺	2.0	100	1000	0

3 结论

(1) 针对国产碳纤维增强复合材料在材料性能、质量一致性、工艺性能和应用等方面与国外皆存在一定差距的实质问题下,建立了一种适用于国产碳纤维缠绕复合材料轴类连接件的可靠性概率设计方法。本设计方法不仅适用于复合材料轴类连接件,同样适用于各种复合材料构件。

(2) 在某工艺下建立的复合材料有限元概率设计方法,通过有限的材料力学性能参数,如拉伸强度、剪切强度、模量等,即可有效评估用此工艺制备的产品可靠性指标,为产品能否达到需求方技术要求而提供早期技术评估。同时大幅降低产品研发成本,缩短研发周期。

(3) 建立的复合材料有限元概率设计方法,能够有效分析出造成产品易失效的主要因素,并能预测出在此主要影响因素下,产品在工作过程中失效件数,从而分析出工艺制备技术是否需要继续提升,为把关产品合格率提高了技术保障。

参考文献

- [1] Ryan R S, Townsend J S. Application of probabilistic analysis and design methods in space programs[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1994, 31(6):1 038-1 043.
- [2] Liu Peiling, Der Kiureghian A. Finite element reliability of geometrically nonlinear uncertain structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117(8):1 806-1 825.
- [3] Bae K, Wang S, Choi K K. Reliability-based topology optimization[C] // 9th AIAA / ISSMO symposium on multidisciplinary analysis and optimization. Atlanta, USA:AIAA, 2002.
- [4] Jung H S, Cho S. Reliability-based topology optimization of geometrically nonlinear structures with loading and material uncertainties[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2004, 43: 311-331.
- [5] 陈亮. 基于有限元法的结构可靠性设计[D]. 南京: 东南大学,

2006.

Chen Liang. Structure reliability design base on finite element method[D]. Nanjing:Southeast University, 2006.

- [6] 刘李. 基于有限元的结构可靠性分析与设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- Liu Li. The research and analysis on structure reliability bases on ansys[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2011.
- [7] 崔玉莲. 国内外机械产品典型可靠性设计方法[J]. 质量与可靠性, 2000, 90(6):24-28.
- Cui Yulian. The Reliability design of mechanical products home and abroad[J]. Quality and Reliability, 2000, 90(6):24-28.
- [8] 许兆棠, 朱如鹏. 直升机复合材料传动轴的主共振分析[J]. 机械工程学报, 2006, 42 (2):155-160.
- Xu Zhaotang, Zhu Rupeng. Main resonance analysis of a composite helicopter driver shaft[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42 (2):155-160.
- [9] 赵稼祥. 碳纤维复合材料在汽车工业的应用[J]. 碳素技术, 2003 (3):18-22.
- Zhao Jiaxiang. Application of carbon fiber composites for automotive industry[J]. Carbon Techniques, 2003(3):18-22.
- [10] 李丽, 顾力强. 碳纤维复合材料传动轴临界转速分析[J]. 汽车工程, 2005, 27(2):239-240.
- Li Li, Gu Liqiang. An analysis on critical rotating speed of carbon fiber composite propeller shaft[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(2):239-240.
- [11] 何东晓, 贾丽霞. 碳纤维在机械设备和建筑物上的应用[J]. 纤维复合材料, 2006, 9(3):55-58.
- He Dongxiao, Jia Lixia. Application of carbon fiber and its composites in mechanical equipment and building[J]. Fiber Composites, 2006, 9(3):55-58.
- [12] Product news:Experience, innovation and close cooperation with leading international companies[EB / OL]. [2004-09-10]. <http://www.jaure.com/caste/catalogo/catalogo.asp>.
- [13] Product news:LM glasfiber service international:Ultrasound scanning assures quality[EB / OL]. [2002-04-07]. http://www.lmwindpower.com/upload/lmnews_200204_uk.pdf.
- [14] Product news:CENTA carbon fibre technology[EB / OL]. [2009-06-10]. <http://pdfszone.com/pdf/centa.html>.
- [15] 中国航空研究院. 复合材料连接手册[M]. 北京: 航空工业出版社出版, 1994:91.
- China Aviation Institute. Composite Connection Brochure[M]. Beijing:Aviation Industry Press, 1994:91.

敦煌年产10万t塑料给排水管材生产线投产

近日,由敦煌市兴宝塑胶科技有限公司投资兴建的年产10万t的聚乙烯(PE)给排水管材生产线投产。该项目位于敦煌市工业园区,占地面积超过135 000 m²,建筑面积35 000 m²,总投资9 800万元,建成管材生产车间3个,目前已开始投产。

PE给排水管材生产线以生产新型绿色、环保塑料管材为主,通过引进国内先进的PE给水管生产线、PE双壁波纹管生产线、PE钢带管生产线及各规格加工模具,实现年生产10万t的PE给水管、PE双壁波纹管及PE钢带管等规格管材。项目完全投产后,年销售收入将达1.35亿元,年利润总额945万元。

(每日甘肃网)