



国防科技图书出版基金

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

 可靠性新技术丛书

Non-Gaussian Random Vibration
Fatigue Analysis and Test Technology

非高斯随机振动 疲劳分析与试验技术

■ 蒋瑜 陶俊勇 程红伟 陈循 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
可靠性新技术丛书

非高斯随机振动 疲劳分析与试验技术

Non-Gaussian Random Vibration
Fatigue Analysis and Test Technology

蒋瑜 陶俊勇 程红伟 陈循 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

非高斯随机振动疲劳分析与试验技术/蒋瑜等著.—北京:国防工业出版社,2019.1

(可靠性新技术丛书)

ISBN 978-7-118-11745-5

I. ①非… II. ①蒋… III. ①随机振动-振动疲劳-分析 ②随机振动-振动疲劳-实验 IV. ①O324 ②O346.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 292465 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京龙世杰印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 14³/₄ 字数 250 千字

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 74.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由中央军委装备发展部**国防科技图书出版基金**资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	柳荣普			
副主任委员	吴有生	傅兴男	赵伯桥	
秘书长	赵伯桥			
副秘书长	许西安	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

可靠性新技术丛书

编审委员会

主任委员:康 锐

副主任委员:周东华 左明健 王少萍 林 京

委 员(按姓氏笔画排序):

朱晓燕 任占勇 任立明 李 想

李大庆 李建军 李彦夫 杨立兴

宋笔锋 苗 强 胡昌华 姜 潮

陶春虎 姬广振 翟国富 魏发远

丛书序

可靠性理论与技术发源于 20 世纪 50 年代,在西方工业化先进国家得到了学术界、工业界广泛持续的关注,在理论、技术和实践上均取得了显著的成就。20 世纪 60 年代,我国开始在学术界和电子、航天等工业领域关注可靠性理论研究和应用技术,但是由于众所周知的原因,这一时期进展并不顺利。直到 20 世纪 80 年代,国内才开始系统化地研究和应用可靠性理论与技术,但在发展初期,主要以引进吸收国外的成熟理论与技术进行转化应用为主,原创性的研究成果不多,这一局面直到 20 世纪 90 年代才开始逐渐转变。1995 年以来,在航空航天及国防工业领域开始设立可靠性技术的国家级专项研究计划,标志着国内可靠性理论与技术研究起步;2005 年,以国家 863 计划为代表,开始在非军工领域设立可靠性技术专项研究计划;2010 年以来,在国家自然科学基金的资助项目中,各领域的可靠性基础研究项目数量也大幅增加。同时,进入 21 世纪以来,在国内若干单位先后建立了国家级、省部级的可靠性技术重点实验室。上述工作全方位地推动了国内可靠性理论与技术研究工作。当然,在这一进程中,随着中国制造业的快速发展,特别是《中国制造 2025》的颁布,中国正从制造大国向制造强国的目标迈进,在这一进程中,中国工业界对可靠性理论与技术的迫切需求也越来越强烈。工业界的需求与学术界的研究相互促进,使得国内可靠性理论与技术自主成果层出不穷,极大地丰富和充实了已有的可靠性理论与技术体系。

在上述背景下,我们组织编著了这套可靠性新技术丛书,以集中展示近 5 年国内可靠性技术领域最新的原创性研究和应用成果。在组织编著丛书过程中,坚持了以下几个原则:

一是**坚持原创**。丛书选题的征集,要求每一本图书反映的成果都要依托国家级科研项目或重大工程实践,确保图书内容反映理论、技术和应用创新成果,力求做到每一本图书达到专著或编著水平。

二是**体现科学**。丛书框架的设计,按照可靠性系统工程管理、可靠性设计与试验、故障诊断预测与维修决策、可靠性物理与失效分析 4 个板块组织丛书的选题,基本上反映了可靠性技术作为一门新兴交叉学科的主要内容,也能在一定时期内保证本套丛书的开放性。

三是**保证权威**。丛书作者的遴选,汇聚了一支由国内可靠性技术领域长江学者特聘教授、千人计划专家、国家杰出青年基金获得者、973项目首席科学家、国家级奖获得者、大型企业质量总师、首席可靠性专家等领衔的高水平作者队伍,这些高层次专家的加盟奠定了丛书的权威性地位。

四是**覆盖全面**。丛书选题内容不仅覆盖了航空航天、国防军工行业,还涉及了轨道交通、装备制造、通信网络等非军工行业。

这套丛书成功入选“十三五”国家重点出版物出版规划项目,主要著作同时获得国家科学技术学术著作出版基金、国防科技图书出版基金以及其他专项基金等的资助。为了保证这套丛书的出版质量,国防工业出版社专门成立了由总编辑挂帅的丛书出版工作领导小组和由可靠性领域权威专家组成的丛书编审委员会,从选题征集、大纲审定、初稿协调、终稿审查等若干环节设置评审点,依托领域专家逐一对入选丛书的创新性、实用性、协调性进行审查把关。

我们相信,本套丛书的出版将推动我国可靠性理论与技术的学术研究跃上一个新台阶,引领我国工业界可靠性技术应用的新方向,并最终为“中国制造2025”目标的实现做出积极的贡献。

康锐

2018年5月20日

前言

振动引起的疲劳问题作为工程领域广泛存在的一个共性问题,严重危及重大装备及结构的安全可靠运行。振动试验是对航空、航天、机械、国防等领域中大型复杂装备和结构进行环境适应性、安全性、可靠性及寿命考核的重要手段。如何保证实验室进行的振动试验符合装备实际服役或运输振动环境,避免欠试验和过试验,为装备结构疲劳损伤分析与安全评定、疲劳可靠性分析与寿命评估提供可信的参考信息,已成为当前亟待解决的工程问题。

非高斯随机振动试验(Non-Gaussian Random Vibration Testing)是近年来发展的新型振动试验技术,是对传统高斯随机振动试验技术的发展与重大突破,能更真实全面地模拟装备经受过实际振动环境和更快速高效地激发结构疲劳缺陷以提高试验效率。

本专著针对非高斯随机振动试验技术领域的理论与方法问题开展讨论,集中了近年来国防科技大学可靠性实验室在该领域的重要研究成果,内容包括非高斯随机振动试验的理论、方法、设备和工程应用的典型案例。

全书共8章:第1章介绍基本概念以及非高斯随机振动试验的研究背景与需求,阐述国内外研究现状,介绍本专著针对的主要问题及内容安排;第2章开展国内外典型装备非高斯随机振动环境分析,并剖析非高斯振动相关的标准;第3章针对非高斯随机振动环境模拟问题,系统介绍两种频谱可控的非高斯振动信号生成与控制方法;第4章针对非高斯振动响应分析的需求,分别介绍单点和基础非高斯振动激励下应力响应计算方法;第5章针对非高斯随机振动疲劳寿命分析需求,介绍窄带和宽带非高斯随机疲劳损伤计算方法;第6章针对非高斯随机振动疲劳可靠性分析需求,分别介绍基于常幅疲劳试验和随机载荷试验的P-S-N曲线估计方法;第7章针对非高斯随机振动加速试验方法问题,介绍了超高斯随机振动加速模型及相应的试验策略与支撑工具,并给出在工程中取得成功应用的案例;第8章总结全书,并对非高斯随机振动相关的应用发展进行展望。

本书力图理论联系实际,既注重对于非高斯随机振动试验这一新型技术领域的基本理论进行诠释,也注重对其试验方法及工程应用进行剖解,以开阔视野,启发思路。希望能为读者揭示这一新型试验技术的相关研究与工程应用前

景,推动非高斯随机振动试验技术的进一步研究与工程应用的深入开展。

本书由蒋瑜副教授负责整体策划,陶俊勇教授、陈循教授负责统稿,第1章、第3章、第7章、第8章由蒋瑜副教授撰写,第2章、第4章由陶俊勇教授撰写,第5章、第6章由程红伟博士撰写。本书的出版是集体智慧的结晶,感谢王得志博士、毛朝博士、于宗乐博士,以及范政伟硕士、刘雨满硕士、吴叶晨硕士等在读期间所做出的成效卓越的研究工作。特别感谢国防科技图书出版基金对本书出版的资助,以及国家自然科学基金和装备预研等相关项目的资助。感谢温熙森教授、康锐教授对本专著的建议。

限于水平,书中难免有不妥或错误之处,恳请读者指正。

作 者

2018年4月

于国防科技大学智能科学学院

第 1 章 绪论	1
1.1 基本概念与内涵	1
1.1.1 高斯随机过程	1
1.1.2 非高斯随机过程	2
1.1.3 振动疲劳	3
1.2 研究现状	4
1.2.1 非高斯随机振动模拟	4
1.2.2 非高斯随机振动响应分析	6
1.2.3 非高斯随机振动疲劳损伤分析	7
1.2.4 非高斯随机振动疲劳可靠性分析	11
1.2.5 非高斯随机振动疲劳试验技术研究	11
1.3 本书内容安排	13
1.3.1 针对的主要问题	13
1.3.2 内容安排	13
参考文献	14
第 2 章 非高斯随机振动环境分析	23
2.1 概述	23
2.2 国外装备超高斯振动环境分析	23
2.2.1 国外轮式车辆振动环境分析	23
2.2.2 非高斯振动环境相关的国外标准分析	24
2.3 国内装备非高斯振动环境分析	26
2.3.1 机载装备非高斯振动环境	26
2.3.2 车载装备非高斯振动环境	42
2.4 结论	47
参考文献	48
第 3 章 非高斯随机振动环境模拟与控制技术	49
3.1 基于相位调制与时域随机化的非高斯随机振动模拟与控制	49
3.1.1 基于二次相位调制的非高斯伪随机振动信号生成算法	49

3.1.2	基于时域随机化的非高斯真随机振动信号生成算法	66
3.1.3	基于相位调制与时域随机化的非高斯随机振动控制算法	75
3.1.4	示例	80
3.2	基于幅值调制和相位重构的非高斯随机振动模拟与控制	87
3.2.1	傅里叶系数对随机信号非高斯特性参数的影响分析	88
3.2.2	基于幅值调制和相位重构的非高斯随机振动信号生成算法 ...	89
3.2.3	基于幅值调制和相位重构的非高斯随机振动控制算法	90
3.2.4	示例	91
	参考文献	96
第4章	非高斯随机振动响应分析	97
4.1	单点非高斯激励下悬臂梁应力响应分析	97
4.1.1	模态分析	97
4.1.2	位移响应	98
4.1.3	应力响应	100
4.2	非高斯基础激励下悬臂梁应力响应分析	101
4.2.1	位移响应	101
4.2.2	应力响应	103
4.3	非高斯激励下应力响应通用计算过程	103
4.4	示例	104
4.4.1	示例 1	107
4.4.2	示例 2	108
4.4.3	疲劳寿命对比分析	108
	参考文献	112
第5章	非高斯随机振动疲劳寿命分析	114
5.1	采样频率与疲劳累积损伤计算精度的关系	114
5.1.1	雨流计数与应力峰值	114
5.1.2	仿真分析	116
5.1.3	基于香农公式的应力信号重构	118
5.2	窄带非高斯随机载荷疲劳损伤计算	120
5.2.1	基础理论	121
5.2.2	非线性变换模型	122
5.2.3	基于非线性变换模型的疲劳损伤计算	123
5.2.4	窄带非高斯疲劳损伤计算的 b 阶矩法	125

5.3 宽带非高斯随机载荷疲劳损伤计算	128
5.3.1 高斯混合模型	128
5.3.2 非高斯随机载荷功率谱分解	129
5.3.3 GMM-Dirlik 公式与疲劳损伤估计	130
5.4 示例	132
5.4.1 窄带非高斯随机载荷疲劳寿命计算示例	132
5.4.2 宽带非高斯随机载荷疲劳寿命计算示例	138
参考文献	142
第6章 非高斯随机振动疲劳可靠性分析	144
6.1 随机载荷引起的疲劳损伤随机性	145
6.1.1 雨流循环次数的随机性	145
6.1.2 雨流分布引起的疲劳损伤的随机性	145
6.2 P-S-N 曲线估计	147
6.2.1 基于常幅疲劳试验的 P-S-N 曲线估计方法	148
6.2.2 基于随机载荷试验的 P-S-N 曲线估计方法	150
6.3 随机载荷作用下结构疲劳可靠性分析	158
6.3.1 疲劳可靠度期望	158
6.3.2 疲劳可靠度置信区间	159
6.4 示例	161
6.4.1 基于蒙特卡罗仿真的疲劳可靠度估计	161
6.4.2 基于理论方法的疲劳可靠度估计	163
6.4.3 结果分析	164
参考文献	165
第7章 非高斯随机振动加速试验方法研究	167
7.1 超高斯随机振动摸底试验	168
7.1.1 试验设计	168
7.1.2 结果分析	173
7.2 随机振动加速试验模型	179
7.2.1 高斯随机振动加速试验模型	179
7.2.2 超高斯随机振动加速试验模型	183
7.3 超高斯随机振动加速试验策略与支撑工具	188
7.3.1 超高斯随机振动加速试验策略	188
7.3.2 支撑工具	191

7.4 超高斯随机振动加速试验应用案例 193

 7.4.1 应用案例 1 193

 7.4.2 应用案例 2 197

参考文献 209

第 8 章 总结与展望 210

 8.1 总结 210

 8.2 展望 211

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Basic Concepts	1
1.1.1 Gaussian Random Process	1
1.1.2 Non-Gaussian Random Process	2
1.1.3 Vibration Fatigue	3
1.2 Research Status	4
1.2.1 Simulation of Non-Gaussian Random Vibration	4
1.2.2 Non-Gaussian Random Vibration Response Analysis	6
1.2.3 Non-Gaussian Random Vibration Fatigue Damage Analysis	7
1.2.4 Non-Gaussian Random Vibration Fatigue Reliability Analysis	11
1.2.5 Non-Gaussian Random Vibration Fatigue Test Technology	11
1.3 Content Arrangement	13
1.3.1 Main Focus	13
1.3.2 Chapter Arrangement	13
References	14
Chapter 2 Non-Gaussian Random Vibration Environment Analysis	23
2.1 Overview	23
2.2 Analysis of Super-Gaussian Vibration Environment of Foreign Equipment	23
2.2.1 Analysis of Vibration Environment of Wheeled Vehicles Abroad	23
2.2.2 Analysis of Foreign Standards Related to Non-Gaussian Vibrational Environment	24
2.3 Analysis of Non-Gaussian Vibration Environment of Domestic Equipment	26
2.3.1 Non-Gaussian Vibration Environment of Airborne Equipment	26
2.3.2 Non-Gaussian Vibration Environment of Vehicle Equipment	42
2.4 Conclusions	47

References	48
Chapter 3 Simulation and Control Technology of Non-Gaussian Random Vibration Environment	49
3.1 Non-Gaussian Random Vibration Simulation and Control Based on Phase Modulation and Time Domain Randomization	49
3.1.1 Generation Algorithm of Non-Gaussian Quasi-random Vibration Signal Based on Twice Phase Modulation	49
3.1.2 Generation Algorithm of Non-Gaussian True Random Vibration Signal Based on Time Domain Randomization	66
3.1.3 Non-Gaussian Random Vibration Control Algorithm Based on Phase Modulation and Time Domain Randomization	75
3.1.4 Examples	80
3.2 Non-Gaussian Random Vibration Simulation and Control Based on Amplitude Modulation and Phase Reconstruction	87
3.2.1 Influence of Fourier Coefficient on Non-Gaussian Parameters of Random Signals	88
3.2.2 Generation Algorithm of Non-Gaussian Random Vibration Signal Based on Amplitude Modulation and Phase Reconstruction	89
3.2.3 Non-Gaussian Random Vibration Control Algorithm Based on Amplitude Modulation and Phase Reconstruction	90
3.2.4 Examples	91
References	96
Chapter 4 Non-Gaussian Random Vibration Response Analysis	97
4.1 Analysis of Stress Response of Cantilever Beam under Single Point Non-Gaussian Excitation	97
4.1.1 Modal Analysis	97
4.1.2 Displacement Response	98
4.1.3 Stress Response	100
4.2 Stress Response Analysis of Cantilever Beam under Non-Gaussian Base Excitation	101
4.2.1 Displacement Respons	101
4.2.2 Stress Response	103

4.3	General Calculation Process of Stress Response under Non-Gaussian Excitation	103
4.4	Examples	104
4.4.1	Example 1	107
4.4.2	Example 2	108
4.4.3	Comparison Analysis of Fatigue Life	108
	References	112
Chapter 5	Non-Gaussian Random Vibration Fatigue Life Analysis	114
5.1	Relationship Between Sampling Frequency and Calculation Accuracy of Fatigue Cumulative Damage	114
5.1.1	Rainflow Counts and Stress Peaks	114
5.1.2	Simulation Analysis	116
5.1.3	Stress Signal Reconstruction Based on Shannon Formula	118
5.2	Narrowband Non-Gaussian Random Load Fatigue Damage Calculation	120
5.2.1	Basic Theory	121
5.2.2	Nonlinear Transformation Model	122
5.2.3	Fatigue Damage Calculation Based on Nonlinear Transformation Model	123
5.2.4	b -th Moment Method for Narrowband Non-Gaussian Fatigue Damage Calculation	125
5.3	Broadband Non-Gaussian Random Load Fatigue Damage Calculation	128
5.3.1	Gaussian Mixture Model	128
5.3.2	Power Spectrum Decomposition of Non-Gaussian Random Load	129
5.3.3	GMM-Dirlik Formula and Fatigue Damage Estimation	130
5.4	Examples	132
5.4.1	Calculation Example of Narrowband Non-Gaussian Random Load Fatigue Life	132
5.4.2	Calculation Example of Broadband Non-Gaussian Random Load Fatigue Life	138