



国防科技图书出版基金

Fatigue Reliability Analysis and Its Application
of Tracked Vehicle for Self-propelled Guns

自行火炮履带底盘系统 疲劳可靠性分析及应用

贾长治 李亚东 马吉胜 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

自行火炮履带底盘系统疲劳 可靠性分析及应用

**Fatigue Reliability Analysis and Its Application of
Tracked Vehicle for Self-propelled Guns**

贾长治 李亚东 马吉胜 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

自行火炮履带底盘系统疲劳可靠性分析及应用 / 贾
长治, 李亚东, 马吉胜著. —北京: 国防工业出版社,
2015. 3

ISBN 978-7-118-09534-0

I. ①自... II. ①贾... ②李... ③马... III. ①自行火
炮-履带-底盘-疲劳-可靠性 IV. ①TJ818

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 285072 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 6 3/8 字数 173 千字

2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 58.00 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

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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。

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总装备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,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业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。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防

科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作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	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	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		

前 言

火炮是地面作战体系中的重要力量,因其在第二次世界大战中的卓越战绩而被誉为“战争之神”。自行火炮是我军列装的一种高新技术装备,集传统火炮的火力系统与装甲底盘于一身,已成为现代战争中重要的主战装备之一。自行火炮工作条件非常恶劣,战斗载荷、冲击载荷和摩擦磨损随机载荷对底盘系统的部件损伤特别严重,故障发生率较高。多种资料表明,疲劳破坏是自行火炮底盘系统的主要失效模式。因此,研究自行火炮底盘系统的疲劳可靠性定量分析技术,掌握底盘系统典型零部件的疲劳寿命及劣化规律,对于保证装备完成任务至关重要。

国内外学者和工程技术人员一直希望通过研究装备设计和研制过程中疲劳可靠性,解决自行火炮履带底盘系统可靠性较低的问题,而载荷获取是进行疲劳可靠性分析的“瓶颈”。虚拟样机仿真分析技术为疲劳可靠性分析的载荷获取提供了全新的方法,该方法涉及内容广泛,包括底盘系统的建模分析、地面特性分析、动力学分析、载荷谱获取和疲劳可靠性分析等内容。广大的工程技术人员迫切需要一本系统研究虚拟样机技术和分析自行火炮履带底盘系统疲劳可靠性的书籍。

经过 10 多年的摸索与工程实践,在总结借鉴有关装备研究成果的基础上,我们编写了本书。本书由五部分组成,分为 8 章。第一部分包括第 1 章,介绍了疲劳可靠性研究的意义和发展概况。第二部分包括第 2、3 章,论述了路面模型的数字重构方法和虚拟样机的建立。第三部分包括第 4、5 章,全面论述了底盘系统构件的选取及载荷谱的获取方法。第四部分包括第 6、7 章,论述了分析单轴和多轴加载构件高低周疲劳的疲劳可靠性方法。第五部分包括第 8 章,论述了具有相关性

的系统的可靠性分析方法,系统介绍了 Copula 函数的定义、基本性质及相关定理,并且基于 Copula 函数的理论,对串、并联等系统进行可靠性分析,得到求解构件部分相关机械系统可靠性的方法。

本书的研究成果,对于提高我军装备的作战能力,加速形成装备的战斗力和保障力,具有重要的军事意义和现实的经济效益,对可靠性领域的研究具有重要的参考价值。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目“多元失效耦合的复杂机械系统可靠性匹配优化技术(51175508)”和河北省自然科学基金项目“复杂机械系统随机可靠性分析方法(E2012506009)”的资助。

感谢疲劳研究领域的众多学者和工程技术专家!他们出色的工作给了我们很多启迪与帮助。感谢课题组参加编写工作的杜秀菊副教授、张庆霞高工、杜中华讲师、陶辰立讲师、汤清洪,感谢参与本书校对工作的研究生刘喆,他们对本书的出版做出了贡献,对他们的工作深表谢意。

由于水平有限,书中疏漏和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 背景及意义	2
1.2 研究现状	3
1.2.1 疲劳可靠性研究的发展史	3
1.2.2 构件疲劳可靠性的分析方法	4
1.2.3 系统的疲劳可靠性理论	11
第 2 章 地面模型	14
2.1 行驶试验概述	14
2.2 路面的等级划分	16
2.2.1 路面的标准化分级方法	16
2.2.2 路面谱测量方法	19
2.2.3 路面的分级	22
2.3 路面重构方法	24
2.3.1 路面功率谱研究	24
2.3.2 试验路面数字化建模	28
2.4 行驶阻力修正	33
第 3 章 履带底盘系统的虚拟样机及验证	36
3.1 履带底盘系统结构组成及力学模型	36
3.1.1 底盘部分结构组成	37
3.1.2 力学模型	38

3.2	虚拟样机建模	47
3.2.1	多体动力学理论	47
3.2.2	MSC. ADAMS 软件及算法基础	49
3.2.3	虚拟样机的建立步骤	50
3.3	仿真数据的真实性验证	52
第4章	履带底盘系统构件载荷谱获取	55
4.1	实车试验概述	55
4.1.1	试验方案	55
4.1.2	传感器的安装	56
4.2	构件载荷谱的建立	58
4.2.1	扭力轴载荷谱	58
4.2.2	主动轮载荷谱	60
4.2.3	履带板载荷谱	60
4.3	载荷谱的去干扰处理	64
第5章	履带底盘系统可靠性数据收集与分析	66
5.1	可靠性数据收集与分析	67
5.1.1	可靠性数据收集与分析的重要性	67
5.1.2	可靠性数据收集	67
5.1.3	可靠性数据分析	69
5.2	履带底盘系统构件失效模式分析	70
5.2.1	自行火炮传动系统现场数据分析	70
5.2.2	传动系统 FEMCA 分析表	75
5.2.3	传动系统部件失效形式分类	82
第6章	履带底盘系统构件应力-应变分布的随机性分析	84
6.1	单轴加载构件局部应力-应变谱的获取与分析	85
6.1.1	稳态循环应力-应变曲线的定义及描述	85
6.1.2	单轴加载构件局部应力、应变的求解方法	89

6.1.3	材料随机性对应力、应变的影响	95
6.1.4	载荷随机性对应力、应变的影响	97
6.1.5	局部应力-应变谱的联合二维分布	100
6.1.6	实例分析	101
6.2	多轴随机加载构件应力、应变的统计分析	110
6.2.1	多轴加载构件的等效应力-应变场强法的计算	111
6.2.2	应力、应变场强度的随机有限元计算方法	115
6.2.3	实例分析	117
第7章	履带底盘系统构件的疲劳可靠性分析	132
7.1	构件的疲劳可靠性理论	132
7.1.1	疲劳寿命的计算方法	132
7.1.2	疲劳累积损伤理论	134
7.2	应力-应变谱的统计分析	136
7.2.1	应力、应变的统计计数	136
7.2.2	应力、应变的修正	137
7.2.3	应力-应变谱的统计分级	140
7.2.4	高、低周疲劳的解耦	141
7.3	高周疲劳损伤概率密度函数的求解方法	142
7.3.1	高周疲劳可靠性的分析方法	142
7.3.2	概率密度函数的求解	144
7.4	低周疲劳损伤概率密度函数的求解方法	146
7.4.1	求解疲劳寿命分布的随机响应面法	146
7.4.2	疲劳寿命分布的 Hermite 多项式展开	147
7.4.3	概率密度函数的求解	149
7.5	构件疲劳寿命的预测方法	150
7.5.1	单一工况下构件的疲劳寿命预测	150
7.5.2	复杂工况下构件的疲劳寿命预测	151
7.6	实例分析	151

第 8 章 具有相关性的系统可靠性分析	165
8.1 Copula 函数介绍	165
8.1.1 Copula 函数的定义	165
8.1.2 Copula 函数的分类	168
8.1.3 Copula 函数的参数估计	171
8.2 构件相关的系统可靠性分析	171
8.2.1 串联系统的可靠性	172
8.2.2 并联系统的可靠性	175
8.2.3 k/n 系统的可靠性	177
8.2.4 混联系统可靠性分析	178
8.3 构件相关的履带底盘行走系统可靠性分析	179
8.3.1 扭力轴系统可靠性分析	179
8.3.2 主动轮系统可靠性分析	181
8.3.3 履带系统可靠性分析	182
8.3.4 履带底盘行走系统可靠性分析	182
参考文献	184

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and significance	2
1.2 Research status	3
1.2.1 History of fatigue reliability research	3
1.2.2 Fatigue reliability analysis methods	4
1.2.3 Fatigue reliability theory of systems	11
Chapter 2 Ground model	14
2.1 Driving test overview	14
2.2 Grading of pavements	16
2.2.1 Standardized method for classification of roads	16
2.2.2 Road spectrum measurement methods	19
2.2.3 Grading of roads	22
2.3 Pavement reconstruction	24
2.3.1 Power spectra of roads	24
2.3.2 Digital modeling of roads	28
2.4 Running resistance correction	33
Chapter 3 Virtual prototyping and verification of tracked vehicle system	36
3.1 Structures and mechanical model of tracked vehicle	36
3.1.1 Structures of chassis	37

3. 1. 2	Mechanical model	38
3. 2	Virtual prototype modeling	47
3. 2. 1	Multi – body dynamics theory	47
3. 2. 2	MSC. ADAMS software and basic algorithms	49
3. 2. 3	Steps to create virtual prototype	50
3. 3	Verification of simulation data	52
Chapter 4	Loading spectrum acquisition of tracked vehicle components	55
4. 1	Overview of live test of vehicle	55
4. 1. 1	Test plan	55
4. 1. 2	Installation of sensor	56
4. 2	Establishment of the loading spectrum of components	58
4. 2. 1	Loading spectrum of torsional axle	58
4. 2. 2	Loading spectrum of driving wheels	60
4. 2. 3	Loading spectrum of track shoe	60
4. 3	Eliminating of interference from loading spectrum	64
Chapter 5	Reliability data collection and analysis of tracked vehicle system	66
5. 1	Reliability of data collection and analysis	67
5. 1. 1	Importance of reliability data collection and analysis	67
5. 1. 2	Reliability data collection	67
5. 1. 3	Reliability data analysis	69
5. 2	Failure analysis of tracked vehicle components	70
5. 2. 1	Live data analysis of self – propelled guns driving system	70
5. 2. 2	FEMCA analysis table of driving system	75
5. 2. 3	Failure modes classification of driving system	82

Chapter 6	Stochastic analysis of stress and strain distribution of tracked vehicle components	84
6.1	Local stress and strain spectrum acquisition and analysis of components under uniaxial loading	85
6.1.1	Definition and description of steady cyclic stress – strain curve	85
6.1.2	Solution of local stress and strain of components under uniaxial loading	89
6.1.3	Effects on stress and strain of material randomness	95
6.1.4	Effects on stress and strain of load randomness	97
6.1.5	Joint two – dimensional distribution of local stress and strain spectrum	100
6.1.6	Case study	101
6.2	Stress and strain statistical analysis of components under multiaxial random loading	110
6.2.1	Equivalent stress – strain field intensity method for multiaxial loading components	111
6.2.2	Stochastic finite element method for stress – strain field intensity calculation	115
6.2.3	Case study	117
Chapter 7	Fatigue reliability analysis of tracked vehicle components	132
7.1	Fatigue reliability theory of components	132
7.1.1	Calculation of fatigue life	132
7.1.2	Fatigue cumulative damage theory	134
7.2	Statistical analysis of stress – strain spectrum	136
7.2.1	Statistical counting of stress and strain	136

7.2.2	Correction of stress and strain	137
7.2.3	Statistical grading of stress – strain spectrum	140
7.2.4	Decoupling of high and low cycle fatigue	141
7.3	Solution of probability density function of high cycle fatigue damage	142
7.3.1	Methods for high cycle fatigue reliability analysis ...	142
7.3.2	Solution of probability density function	144
7.4	Solution of the probability density function of low cycle fatigue damage	146
7.4.1	Stochastic response surface method to solve fatigue life distribution	146
7.4.2	Hermite polynomial expansion of fatigue life distribution	147
7.4.3	Solution of probability density function	149
7.5	Prediction method for components fatigue life	150
7.5.1	Fatigue life prediction of components under single operating condition	150
7.5.2	Fatigue life prediction of components under complex operating conditions	151
7.6	Case study	151

Chapter 8	Reliability analysis of a system with correlated components	165
8.1	Introduction of copula functions	165
8.1.1	Definition of copula functions	165
8.1.2	Classification of copula functions	168
8.1.3	Parameter estimation of copula functions	171
8.2	System reliability analysis with correlated components	171
8.2.1	Reliability of series systems	172
8.2.2	Reliability of parallel systems	175

8. 2. 3	Reliability of k/n systems	177
8. 2. 4	Reliability analysis of systems in parallel and series	178
8. 3	Reliability analysis of a tracked vehicle system with correlated components	179
8. 3. 1	System reliability analysis of torsional axle	179
8. 3. 2	System reliability analysis of driving wheel	181
8. 3. 3	System reliability analysis of track	182
8. 3. 4	Reliability analysis of tracked vehicle system	182
References		184