



现代车辆结构疲劳寿命预测 和耐久性分析

缪炳荣 著

非外借



科学出版社

现代车辆结构疲劳寿命预测 和耐久性分析

Modern Vehicle Structure Fatigue Life Prediction
and Durability Analysis

缪炳荣 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书重点阐述如何利用多体动力学和有限元法的混合模拟技术进行车辆结构疲劳寿命评估和耐久性分析,对利用多学科优化系统进行结构疲劳分析也有所涉及。具体内容包括:首先,介绍结构疲劳寿命预测的基本理论背景和概念;其次,重点介绍基于多体动力学和有限元法的车辆结构疲劳寿命预测及评估具体方法,内容涵盖车辆动力学分析、有限元法、结构动应力分析和测试技术、疲劳载荷及载荷谱、疲劳寿命预测方法和其他相关有限元疲劳评估技术;最后,结合实际算例从车辆结构动力学特性的角度讨论车辆结构振动特性和结构疲劳寿命之间的机理关系。

本书可作为高等院校涉及车辆结构有限元疲劳分析技术的研究生课程教材,也可以作为力学、机械、土木等其他相关专业类结构疲劳寿命预测研究生的教学参考用书。对从事新产品车辆结构疲劳强度分析和疲劳寿命预测的科研、工程人员均具有一定的参考意义和实用价值。

图书在版编目(CIP)数据

现代车辆结构疲劳寿命预测和耐久性分析/缪炳荣著. —北京:科学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-03-054252-6

I. ①现… II. ①缪… III. ①汽车-车体结构-疲劳寿命-预测 ②汽车-车体结构-耐用性-分析… IV. ①U463.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017) 第 209410 号

责任编辑:刘信力/责任校对:张凤琴
责任印制:张伟/封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2017年9月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年9月第一次印刷 印张:15 3/4

字数:300 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

目前,国内外轨道车辆装备制造企业已经大量使用新型结构与材料,积极开展数字化、模块化、集成化设计和制造等先进技术。近十年来,迅猛发展的中国高铁更是持续以一系列国家重大技术发展计划为支撑,针对车辆结构的安全性展开了系统和深入的研究,取得了斐然的成绩。在这些科研项目中,车辆结构部件的疲劳寿命预测和耐久性问题,一直是众多学者和科研工作者所关心的技术难题。如何真正实现车辆新产品的结构轻量化、节能降耗、安全可靠和物理失效控制等产品性能最优,也是高速列车新产品开发过程中重要的研究课题。尽管人们对结构疲劳设计问题的研究已经有 100 多年的历史,但是由于结构疲劳分析的复杂性和众多不确定性因素的影响,使得多数工程技术人员依然依靠传统的结构和材料疲劳强度的设计和分析方法。也正是由于影响寿命预测的不确定因素众多,比如载荷、材料、结构设计和制造加工工艺等,对于能否准确预测车辆结构疲劳寿命在很多工程技术人员的心中产生了怀疑。另外,轻量化设计已经成为未来车辆结构新产品开发的主要发展趋势,但也可能导致结构振动加剧、耐久性下降和物理失效等一系列技术问题。车辆结构局部刚度的减弱和随着速度提高车辆结构动力学特性的恶化,均容易导致车辆结构发生局部共振和结构振动疲劳等一系列失效问题。

这就使得车辆关键结构部件的抗疲劳设计和寿命预测方法成为现实工程结构疲劳研究的重要技术难题之一。经过众多国内外专家与学者们的不懈努力,针对现代车辆结构疲劳设计理论人们已经提出了很多具体的研究方法和思路。比如,工程师们可以基于线弹性结构有限元疲劳分析技术,采用安全系数和疲劳概率设计方法来确定最终的车辆结构服役寿命。但是对于一些关键车辆结构部件,采用较大安全系数不仅会造成结构过设计 (Over-Design),而且也有可能因为刚度设计中结构局部过刚和非均匀化产生应力集中,导致结构部件服役寿命存在更多的不确定性,且焊接疲劳因素的影响也不可忽略。如何准确预测因为轻量化设计可能导致的结构耐久性问题,且尽可能减小物理样机的生产数量和制造成本,实现结构物理损伤控制,依然是值得深入研究的关键技术课题。

就车辆结构失效问题而言,结构动应力过大一直是导致结构产生疲劳失效的主要原因之一。振动疲劳的研究意义正是基于此,从结构振动特性的角度研究结构振动特性和疲劳之间的作用机理与关系。解决随机动载作用下的结构疲劳问题,主要考虑 3 个关键因素,即结构几何特征 (Structure Geometry)、载荷时间历程 (Load Time Histories)、材料特性 (Material Characteristics 或 Material Property)。疲劳寿

命预测是现代车辆结构疲劳研究领域的研究热点和主要发展趋势，为了选择最合适的结构疲劳评估理论和方法，不仅要理解结构疲劳损伤的作用机理，而且要了解车辆结构的动态特性。这些均是准确预测结构疲劳寿命的重要前提。

与国内外同类书籍相比，本书有如下的特点：

(1) 在学术思想方面，密切结合实际工程中车辆结构在复杂载荷环境下所面临的载荷历程、材料特性和结构几何特征三要素，从动力学与有限元分析的角度完整提出复杂车辆结构的耐久性分析的系统方法。

(2) 在工程应用方面，针对实际工程中出现的抗疲劳设计和寿命预测精度的问题，系统归纳、整理和分析了基于多体动力学和有限元法对复杂车辆结构展开疲劳寿命预测的基本思路和方法，为结构疲劳设计提出有效的措施和建议。

在车辆结构耐久性设计过程中，如果仅通过常规结构疲劳设计方法，直接将有限元静强度分析或试验结果应用在车辆结构的疲劳强度评估上，虽然方法简单实用，但并不能完全真实地反映和解决实际车辆结构随机动载荷变化导致的疲劳失效问题。实际服役的车辆结构部件主要承受的是随机变幅动载荷，且很多车辆结构疲劳发生的根本原因是由于车辆结构的振动特性恶化，使得结构动应力过大或者共振疲劳失效，最终导致车辆结构疲劳裂纹萌生、扩展甚至断裂。国内外大量文献也证明了从动力学的角度研究车辆结构疲劳寿命预测和耐久性分析的必要性。

针对传统的结构疲劳设计及寿命预测技术已经不能完全满足现代车辆结构产品的疲劳设计的问题，人们一直在努力探索新的寿命预测和耐久性分析方法。目前，很多结构疲劳文献多数是从材料微观特性和焊接工艺角度研究结构疲劳寿命的预测问题，容易忽略结构疲劳研究的复杂性和多学科的特点，比如整车动力学特性和载荷谱等因素对车辆结构疲劳特性的影响。这也是作者从选择结构疲劳作为自己博士论文题目时就一直在认真思考的问题，是萌发作者撰写这部书的最初始的动机。

但是，从很多结构疲劳文献看，真正从车辆动力学角度研究结构疲劳及进行寿命预测与耐久性分析的书籍与其他相关文献资料真的太少了，初学者容易存在很多基本理论和概念不清的问题。本书除了向许多文献的作者们认真学习外，就是希望能够独辟蹊径，从动力学的角度，或者说从工程分析的角度探索一下研究结构疲劳寿命的评估理论，以通俗易懂的方式阐述这种研究方法。实际上，随着多体动力学和有限元法的逐渐发展成熟，解决车辆结构的振动疲劳的问题已经逐步成为可能。

撰写本书的计划是在作者进行国内轨道交通领域第一个国家 973 计划项目(2007CB714700)的研究期间(2007~2012)就已经开始准备。如何准确阐述结构疲劳寿命的研究方法对作者而言，由于水平有限，撰写任务非常繁重。如何写出新意，总结出自己这些年在结构振动疲劳领域的探索成果，更是困扰多年，经常夜不能

寐。2013年夏,作者正好到美国加利福尼亚大学 Merced 分校 (UC Merced) 进行访问学者的科研学习任务。在那个小镇里,终于可以静下心来,认真思考很多平时结构疲劳研究中容易忽略的学术问题。针对结构疲劳破坏问题的解决,自己决定还是从头开始,一篇一篇的文献重新阅读和学习。在此期间,作者不仅在学习国外一流大学的先进科研方法和知识的同时,也在规划和整理自己的书稿。根据自己阅读的大量文献,可以发现其中有两本重要的关于结构疲劳的著述,一本是 N. Bishop 撰写的关于有限元疲劳的电子书籍,内容虽然相对较少,但非常浅显易懂,里面有七章由浅入深地专门讲述有关有限元疲劳方法;另外一本是 Tom Lassen 和 Naman Recho 所著的《焊接结构疲劳寿命分析》,这是很厚的一本英文书籍,内容也很详实。通过认真阅读和对结构疲劳寿命预测相关内容反复思考,自己有了茅塞顿开的感觉,更坚定了自己尝试如何用通俗易懂的方法阐述复杂科学问题的信心和勇气。撰写本书的真正目的只是想认真总结一下自己十余年来在结构疲劳领域的探索脚步。每当看到中国知网 (CNKI) 上自己博士论文的下载量已经超过 6166 次,就感觉自己为之努力和奋斗非常值得。这也算是对自己在结构疲劳研究领域十余年来努力探索的一种交代和总结。书稿是数十次反复修改,甚至一段时间,看到新的结构疲劳文献,又需要重新整理书稿,每到夜深失眠,常有殚精竭虑的感觉。

随着有限元疲劳分析技术的发展,利用虚拟样机技术进行结构疲劳特性评估已经成为现代车辆产品设计的一种发展趋势。针对车辆结构部件的疲劳可靠性设计中出现的新问题和新特点,从动力学和有限元的角度深入系统研究复杂载荷环境下整车动力学特性和结构疲劳特性之间的作用机理问题,不仅具有十分重要的工程应用前景,而且具有一定的科学理论研究价值。这里简单陈述从整车动力学角度研究结构疲劳寿命预测的意义:

(1) 车辆系统动力学特性是影响结构安全问题的关键因素,从动力学的角度研究整车振动特性对车辆结构关键部件的疲劳可靠性问题十分必要,能够很好地研究结构振动特性与疲劳特性之间的作用机理;

(2) 结合实际工程中出现的车辆结构疲劳可靠性相关的工程技术难题,将现代车辆结构的有限元疲劳和传统结构疲劳设计理论结合起来,且根据相关试验结果和理论相互验证,是完善现代车辆结构抗疲劳设计理论和寿命预测方法的有效途径之一;

(3) 从结构设计与制造、载荷谱计算与试验 (结构与材料疲劳试件的试验、线路动应力测试等)、强度理论及断裂力学、疲劳可靠性设计理论等角度,对车辆结构开展基于多体系统动力学和有限元法的多学科疲劳优化设计技术的研究十分必要,可以从根本上解决一些结构部件的振动疲劳问题。

本书内容主要是作者在博士论文、博士后研究报告的基础上,结合作者近年来主持国家自然科学基金面上项目 (51375405)、国家 863 计划项目子课题

(2009AA110303-01)、教育部博士点基金 (2009018420016)、中央高校科研专项项目 (SWJTU09CX061)、四川省应用基础研究基金 (2012JY094)、国家重点实验室基础研究项目 (2012TPL T08 和 2016TPL T10), 以及主研的国家 973 和 863 计划项目、国家自然科学基金重点项目、铁道部科技开发项目的基础上的部分科研成果。也可以说, 本书结合国内外相关领域的大量结构疲劳文献, 以及作者十余年来在轨道车辆关键结构部件疲劳寿命预测方面的研究成果, 就现代车辆结构疲劳寿命预测和耐久性分析的理论体系进行了较为深入和系统的总结与探讨。

最后, 诚挚感谢这么多年来一直关心、指导和帮助过作者的领导、同事和朋友们。特别感谢作者的导师张卫华教授、金鼎昌教授、肖守讷研究员的细心培养; 感谢国家 973 计划项目疲劳课题组和国家自然科学基金面上项目课题组里的各位老师和研究生们; 感谢自己的家人和课题组的研究生们; 感谢科学出版社编辑刘信力博士和其他工作人员对本书出版付出的辛勤工作。本书的出版是大家共同努力的成果。

作者只是结构疲劳研究领域的一名普通的学人, 水平有限, 敬请结构强度与材料疲劳研究等领域的各位前辈和专家学者们, 不吝赐教, 给予批评指正。作者也真心希望这本书能成为现代车辆结构疲劳寿命预测领域抛砖引玉的一本书, 愿和朋友们一起分享书中对结构疲劳寿命预测方法不断探索的热情和执着, 分享自己这么多年来从事结构疲劳寿命预测方法科研过程中的艰辛努力, 在此鞠躬深表感谢!

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 概述	2
1.2 车辆结构疲劳	5
1.3 文献综述	9
1.4 研究对象和范围	11
1.5 本书特色和重点	13
1.6 章节内容安排	14
参考文献	15
第 2 章 理论背景及寿命预测方法	19
2.1 疲劳设计思想	19
2.1.1 基本概念与寿命估算方法	21
2.1.2 疲劳寿命预测三要素	27
2.1.3 基于多体动力学和有限元法的车辆寿命预测方法	30
2.1.4 WAFO 雨流矩阵	33
2.1.5 统计方法的考虑	37
2.2 名义应力法	37
2.2.1 材料与结构部件的应力寿命曲线	39
2.2.2 S-N 曲线的局限性	43
2.2.3 平均应力及修正方法	44
2.3 应变-寿命法	47
2.3.1 应变-寿命 (ϵ -N) 曲线	47
2.3.2 循环加载及迟滞回线	48
2.3.3 平均应力修正及其他修正	49
2.4 临界平面法	52
2.4.1 多轴疲劳的裂纹萌生和扩展	53
2.4.2 多轴疲劳的损伤模型	53
2.4.3 小裂纹模型	54
2.5 焊接结构疲劳问题	54
2.5.1 焊接结构的寿命预测方法	54

2.5.2	焊接结构的裂纹增长	57
2.5.3	焊接结构的疲劳分析	57
2.6	损伤累积法则	58
2.6.1	结合 S-N 曲线预测疲劳寿命	59
2.6.2	Miner 修正	60
2.6.3	雨流循环计数	61
2.6.4	非平均应力的等效变换	63
2.6.5	疲劳寿命的估计精度	64
2.6.6	基于断裂力学的裂纹扩展分析	65
2.7	本章小结	66
	参考文献	66
第 3 章	车辆多体动力学建模和仿真	70
3.1	基本理论及工程背景	72
3.1.1	概述	73
3.1.2	多体动力学基本理论	77
3.1.3	车辆动力学系统的一般算法	80
3.2	车辆多体动力学建模与仿真	81
3.2.1	轨道激励谱与时频转换方法	83
3.2.2	动力学仿真算例	92
3.3	柔性多体动力学仿真	103
3.3.1	建模假设	103
3.3.2	子结构算法	104
3.3.3	弹性体的实现	105
3.4	本章小结	109
	参考文献	109
第 4 章	疲劳寿命预测和耐久性设计中的有限元分析	111
4.1	概述	111
4.2	有限元法的基本原则	113
4.2.1	建模基本原则	115
4.2.2	模型简化方法	115
4.2.3	附件质量模拟	116
4.3	有限元分析在车辆结构疲劳的作用	117
4.4	结构模态分析	120
4.5	子结构分析	122
4.6	有限元建模中的细节	124

4.6.1	建模细节与注意	125
4.6.2	节点应力与单元应力	127
4.6.3	绝对最大主应力和 Von Mises 应力	128
4.6.4	单元类型的选择及网格划分	130
4.6.5	边界条件的加载及数据处理	131
4.6.6	疲劳分析中有限元分析及前后处理	133
4.7	简单算例	136
4.8	小结	137
	参考文献	138
第 5 章	结构动应力的计算分析与试验验证	140
5.1	结构疲劳分析过程中的动应力计算	140
5.1.1	载荷时间历程	141
5.1.2	结构寿命评估中的应力分析	143
5.1.3	基于多体-有限元法的动应力计算	149
5.1.4	结构动应力计算的算例	151
5.2	结构动应力试验的结果分析与验证	154
5.2.1	动应力测试方案	154
5.2.2	某型机车车体结构动应力实测	155
5.2.3	某型动车在京津城际线路动应力测试	173
5.3	小结	180
	参考文献	181
第 6 章	疲劳载荷及载荷谱分析技术	183
6.1	疲劳载荷分析考虑的因素	184
6.1.1	疲劳载荷的基本概念	187
6.1.2	不规则载荷和循环计数	188
6.1.3	非平均应力的等效变换	189
6.2	载荷谱	189
6.2.1	载荷谱定义和形成	189
6.2.2	载荷工况及典型载荷谱	194
6.2.3	载荷谱的数据采集及处理技术	196
6.3	载荷谱的统计分析 with 外推处理及载荷谱叠加	199
6.3.1	载荷谱样本的统计分析	199
6.3.2	载荷谱压缩、外推、叠加与重构	199
6.4	载荷谱数据的其他处理	202
6.4.1	载荷谱样本的雨流计数	202

6.4.2 载荷谱编谱及小载荷循环处理	203
6.5 小结	205
参考文献	205
第 7 章 结构疲劳寿命预测及工程应用实例	209
7.1 完整的车辆结构疲劳寿命评估技术	210
7.1.1 车辆结构疲劳寿命预测过程	211
7.1.2 疲劳寿命预测的时域和频域方法	217
7.1.3 疲劳寿命预测及精度影响	220
7.1.4 疲劳分析结果的后处理	221
7.2 结构疲劳分析及寿命预测算例	221
7.2.1 算例 1 某型机车车体结构	222
7.2.2 算例 2 某型动车组车体结构	230
7.3 本章小结	236
参考文献	237

第1章 绪 论

自 19 世纪上半叶以来,许多国内外结构疲劳领域的专家学者们都为结构疲劳的研究和发展做出了开拓性的贡献。现代机械结构的疲劳设计与寿命评估等相关分析已逐步发展成为一个包含多学科的研究分支和重要领域。对工业类应用的大型金属结构设计而言,由于疲劳破坏一直是结构的主要失效形式,疲劳强度设计和寿命预测是进行结构抗疲劳设计、强度校核的重要内容。需要说明的是,焊接结构是当前机械结构部件采用最普遍的技术和工艺之一。焊接技术及工艺在车辆结构制造过程中尤显重要。近二十年来,如果没有现代机械结构焊接技术,要完成现代的大型机械结构的设计和制造几乎是不可能的。工程结构中,金属焊接结构比比皆是,比如采用先进焊接工艺技术制造的汽车车身、不同焊接结构形式组成的现代轨道车辆结构(车体、转向架构架,甚至是焊接式轴箱结构等)、大型桥梁钢结构、重型船舶结构、起重装备类工程结构和海上石油勘探平台等。焊接结构的疲劳强度分析通常和其他金属结构的疲劳强度分析是相似的,唯一的区别是焊缝或焊点的疲劳强度分析^[1-8]。

对于各种振动疲劳失效的结构而言,必须要在结构疲劳强度设计的不同阶段通过合理的结构几何设计(强度、刚度、尺寸控制等)、正确的材料选择和典型载荷谱分析等方式,尽可能避免疲劳设计可能产生的失效问题。如今车辆结构存在各种结构设计标准,诸如强度、屈服、屈曲失稳、蠕变、腐蚀等。结构疲劳设计标准等必须要在特定的载荷条件和服役环境中进行仔细检查和遵循。然而,现实中总是存在着这样一种事实,即焊接结构在承受重复变幅载荷循环时,焊接部位更容易产生疲劳损伤和断裂破坏等失效事故。在车辆结构安全服役过程中,在焊接或应力集中区域的附近更容易产生裂纹萌生、裂纹扩展和疲劳断裂等现象。甚至在结构动应力很小和远低于材料屈服应力的情形下,焊接区域也容易产生结构疲劳裂纹。尽管工程结构设计中,已经普遍利用结构和材料 S-N 曲线和线性结构损伤累积理论,进行线弹性结构疲劳寿命预测计算,但是,各种理论与方法还存在着各种相对的不足,疲劳设计和寿命预测的结果依然有很大的误差。对于存在非线性因素的复杂车辆结构关键部件而言,更是很难建立完全准确的疲劳寿命评估模型^[9-11]。

本书将根据机械结构的有限元疲劳方法,介绍如何分析现代车辆结构关键部件的振动疲劳及寿命预测相关的技术问题。只有采用正确的疲劳设计方法和可靠的分析途径才可以有效地进行工程结构疲劳寿命的评估与分析,提高寿命预测结

果的准确性。这也是经过很多工程实践证明可行的结构疲劳设计思路。在阐述车辆结构疲劳寿命预测和耐久性分析的过程中,本书除了借鉴学习传统的结构疲劳设计理论外,也考虑如何利用现代机械结构的振动疲劳分析方法,特别是近些年的有限元疲劳的相关研究成果,从整车动力学分析及有限元法的角度认真探讨车辆结构疲劳寿命预测和耐久性分析的相关内容,比如阐述车辆动力学、结构动应力计算分析理论及相关试验、疲劳载荷谱及寿命预测理论等。

1.1 概 述

当讨论随机动载荷作用下的车辆结构疲劳时,人们通常认为,结构失效可以定义为循环变幅载荷作用下结构部件没有达到设计目标的问题。在工程结构中,结构疲劳失效不仅仅会造成灾难性的后果,而且也会影响产品的安全性、可靠性和耐久性。结构疲劳寿命和耐久性分析方法可以用来帮助避免机械结构失效,确保人身财产的安全,避免结构失效造成的重大经济损失。“结构失效”通常被定义为一些结构部件预先设定的裂纹长度或刚度损失等。材料特性是结构疲劳寿命计算的一项重要因素。“结构疲劳”泛指结构部件在动应力或动应变的作用下,结构部件的材料内部或表面就会因为内部的缺陷(比如夹杂物等)、应力集中(刚度非均匀变化)等内外因素的作用产生裂纹萌生、裂纹扩展、断裂的过程。结构部件因为动应力产生的疲劳磨损而失去工作性能的现象,称之为结构疲劳失效。结构部件抵抗疲劳失效的能力称之为结构疲劳强度;材料疲劳试件抵抗疲劳失效的能力称之为材料疲劳强度。这也是结构疲劳强度和材料疲劳强度之间的概念区别。结构疲劳失效和静强度失效有着明显的区别和特征:载荷的交变性、失效过程的渐变性;断口的脆性和断裂的突然性;应力与应变的缺口敏感性;疲劳断口的独特性^[12]。

另外,根据材料疲劳实验的分析理论和方法,人们已经可以了解到不同的裂纹扩展阶段的一些细节状况,比如相关学者提出的“短裂纹”和“长裂纹”的概念。“短裂纹”就被人们用来处理这种早期材料疲劳裂纹扩展导致的结构失效行为。根据文献报道,目前结构疲劳的研究绝大多数集中在这方面。当然,国内外文献并没有完全一致的概念来定义“短裂纹”。工程上,对于钢结构材料而言,一般认为所有的结构短裂纹的裂纹长度都小于 $1\sim 2\text{mm}$ ^[13]。

结构疲劳包括裂纹萌生(Crack Initiation)、裂纹扩展(Crack Growth,或者Crack Propagation)和疲劳断裂(Fatigue Fracture)三个主要的阶段。疲劳裂纹从萌生阶段扩展到一定临界尺寸的长裂纹,甚至也会因为疲劳断裂导致结构部件断裂成多个小部件。车辆结构疲劳的问题发生很大程度上是因为结构动应力过大导致的结构材料的失效行为,即钢、铁、铝等金属材料在外载荷的作用下,出现了材料晶面的滑移或错开现象。结构疲劳失效的过程不仅是一个材料局部细节的裂纹

萌生及扩展过程，也是一个复杂的动态演变过程，即结构或材料直接受到动应力或动应变的影响。可以说，结构动应力过大是多数车辆结构疲劳破坏发生的根本原因之一。裂纹萌生出现的确切位置，经常也是结构应力集中和动应力过大的位置 [14-20]。

目前，常规结构疲劳寿命分析的主要途径还是基于材料疲劳的基础分析理论，通常采用三种分析方法：基于应力法；基于应变法和断裂力学方法。基于应力法，也常称为应力-寿命方法、S-N 法、名义应力法或总寿命法。基于应变法 (ϵ -N 法)，也称应变-寿命法、局部应力应变法、裂纹萌生法 (Crack-Initiation Method) 和临界位置法 (Critical Location Method)，有时也称为 Manson-Coffin 法或 Critical Location Approach, CLA 法。断裂力学法，常指线弹性断裂力学方法 (Linear Elastic Fracture Mechanics method, LEFM 方法)，用于处理结构疲劳裂纹扩展和疲劳断裂问题。前两种结构疲劳寿命分析技术实际上并不能完整模拟结构疲劳裂纹扩展过程。图 1.1 表示了结构疲劳总寿命定义的全过程。实际上，对于车辆结构疲劳寿命预测和耐久性分析而言，保守的寿命评估概念主要集中在裂纹萌生阶段 [21]。

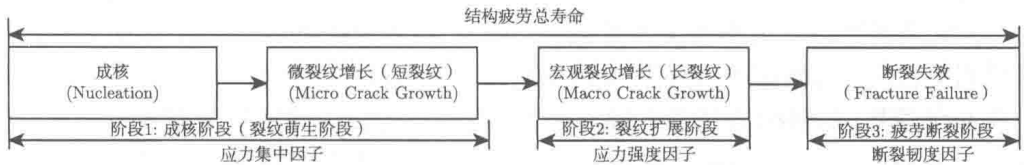


图 1.1 结构疲劳总寿命 [21]

假设结构或材料疲劳试件是在相同载荷环境下进行测试，一般使用相似的概念来确定疲劳失效产生的循环数，直接获得疲劳试样的寿命和载荷水平之间的关系。结构疲劳裂纹的形成存在一个稳定的增长期，通常依赖于线弹性断裂力学方法。一般假定裂纹扩展速率与应力强度因子的范围值成正比 (裂纹扩展率也常定义为裂纹长度、几何形状和应力水平的函数)。图 1.2 显示了现实工程结构中，大型船舶结构的裂纹萌生、裂纹扩展和疲劳断裂破坏的三个主要过程。

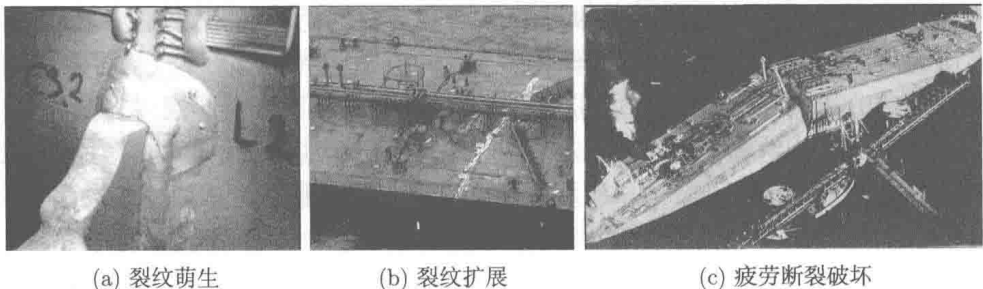


图 1.2 船舶结构疲劳破坏的演变过程 [22]

工程结构中, 疲劳分析大多集中于金属材料与结构部件中。当然, 像其他的非金属材料, 如一些复合材料、橡胶、聚合物、高分子材料等的疲劳破坏机理同样十分复杂。这些材料在大量低应力循环载荷作用下显示出更多的非线性行为, 是比常规结构疲劳设计更加困难的研究课题。另外, 热疲劳问题也是车辆结构疲劳破坏问题经常发生的原因之一, 比如轨道车辆的制动盘的热疲劳问题等。由于热力学的影响机理非常复杂, 一些商业有限元疲劳程序如 ANSYS、Nastran、ABAQUS 等均可以通过热分析获得热应力, 然后通过有限元疲劳寿命的预测技术确定结构在一定温度下的结构疲劳寿命。但是热疲劳分析时, 有时并不能完全有效地考虑“热蠕变”(可能会导致裂纹扩展)、“改变材料特性”(材料特性会随温度变化)和“氧化\腐蚀”(可提高或延缓裂纹扩展)等因素。这些研究课题通常也是结构疲劳领域的重要课题之一。

结构疲劳失效机制复杂, 在于人们在结构失效早期不能有效发现结构初始裂纹的萌生, 经常要等到关键结构部件发生疲劳裂纹扩展和断裂失效后, 才能发现疲劳失效的破坏结果。著名国际汽车公司戴姆勒-克莱斯勒 (Daimler Chrysler) 的测试主管 Tabarelli 博士曾经认为, 无论人们是希望今后 3 天到 5 天内迅速提高结构疲劳寿命预测精度, 达到实际寿命的 65%; 还是渴望在随后的十年里快速提高寿命预测精度, 且达到结构实际寿命的 95%, 对于从事结构耐久性分析 (疲劳强度设计和寿命预测) 的科研人员和工程师而言, 所面临的最大的现实问题或者说最大挑战, 在于如何有效考虑影响结构疲劳寿命预测的三个最重要的因素: 复杂的载荷时间历程、多变的结构几何形状和具有各种分散性的材料特性。这些不确定因素和是否选择了合理的结构疲劳评估理论均严重影响着结构疲劳设计及寿命预测精度。这也表明, 如何提高结构疲劳寿命预测精度是国内外相关结构耐久性分析研究人员和工程师们最关心的核心技术问题之一。

传统工程结构静强度设计方法是根据结构部件的名义应力和材料强度数据 (屈服应力等) 以及实际经验采用载荷安全系数确定结构部件的承载能力。而结构疲劳强度的设计也会根据载荷选择的不同而区分为常幅载荷 (Constant Amplitude Loading, CAL) 和变幅载荷 (Variable Amplitude Loading, VAL) 作用下的结构疲劳强度设计。为此, 人们在分析结构疲劳时, 经常将载荷时间历程作为影响结构疲劳寿命的关键因素之一。为了透彻地了解结构疲劳的产生的根本原因, 不仅需要掌握结构有限元强度分析的相关理论, 也需要理解结构的整体动态特性。通过有限元分析, 不仅可以采用整体结构模型, 也可以采用子模型, 更好地分析结构的应力集中或者说是危险应力发生的区域。结合机械系统动力学, 特别是利用多体系统动力学, 可以分析车辆结构动力学特性对结构疲劳特性的根本影响, 有效理解载荷频率和结构固有频率之间的关系, 以及判定结构是否存在共振效应等振动疲劳问题。

对于许多从事现场结构耐久性设计和分析的工程师而言, 不仅需要考虑保证

结构疲劳强度和寿命预测精度,而且还要分析结构在何时何处可能会产生疲劳裂纹萌生、裂纹扩展和疲劳断裂等失效现象。在现代车辆结构设计过程中占有重要比例的结构疲劳设计方法依赖于有效的结构疲劳分析技术和理论。结构疲劳分析技术是在过去 100 年左右时间里逐渐发展起来的,最初也只是为了解决一些工程结构频繁发生的结构疲劳问题,比如解决铁路车轴断裂的疲劳问题,而开发的一些相对简单的应用程序。这些程序通过比较和分析原型材料或样品材料疲劳试件经过循环载荷测试的应力、应变数据,进行结构抗疲劳设计。

随着计算机技术的不断发展,结构疲劳分析技术也随着疲劳设计理论和计算机辅助工程(CAE)的进步不断得到完善。尤其是为了考虑塑性应变影响而出现的基于应变-寿命的结构疲劳分析技术,使得结构疲劳分析技术逐步变得越来越复杂。如今,随机振动疲劳分析技术已经成为一种重要的结构疲劳分析手段和发展趋势。人们已经可以很好地解决结构单轴疲劳的寿命预测问题,而且对部分多轴疲劳的寿命预测技术以及结构微裂纹的扩展速率分析也已经成为可能。当然,车辆结构随机振动疲劳问题,不是简单地预测结构振动失效和疲劳寿命评估,而是需要综合考虑多个学科的技术难题。结构疲劳损伤过程中出现的裂纹萌生和裂纹扩展的过程,实际上是一个非常复杂的物理现象,不仅仅包括材料疲劳等基础学科的知识,而且也需要准确理解结构的载荷历程以及结构设计导致的结构几何特征变化和刚度突变等因素。在过去几十年里,人们已经逐渐认识到,载荷循环加载和过载均可能导致结构产生渐近破坏的应力或应变,而破坏时的结构应力将远低于预期的材料应力水平。这就需要人们深入研究结构疲劳产生的真正原因和疲劳损伤作用机理,不仅仅从材料的机理研究,也需要从结构设计和载荷的角度去分析。

1.2 车辆结构疲劳

机械结构的安全可靠性能是决定产品质量优劣的关键要素。如何有效利用结构抗疲劳设计和分析方法是保证机械结构疲劳可靠性的有效途径。对于承受随机动载作用下的多数机械结构而言,要在较短的周期内开发出具备良好安全性、可靠性、耐久性和经济性的新产品结构,更需要采用结构抗疲劳设计和有效的寿命评估方法。这样不仅可以在新产品结构设计的早期阶段快速迅速判别出不同设计方案优劣,而且可以提前识别疲劳失效可能发生的危险位置。在对物理样机进行动应力试验前,可以预先分析结构部件的危险区域和测点布置的位置,从而确定性能较优的测试方案。车辆结构关键部件的疲劳问题有其相应的特点,在结构疲劳设计和分析过程中需要考虑其车辆动力学特性影响,结构振动也是导致疲劳失效的主要原因之一。

现代车辆结构耐久性设计理念中,产品抗疲劳性能的优劣是产品性能重要标志

之一。新产品开发中不仅要求结构具有良好的可靠性 (Reliability)、耐久性 (Durability), 而且还要求结构尽可能轻量化 (Lightweight), 以便提高结构承载能力和产品竞争力。随着市场竞争日趋激烈, 产品开发周期极大地缩短, 结构轻量化和耐久性设计也越来越受到重视。结构疲劳可靠性对车辆结构安全性来说尤为重要, 与结构轻量化设计常常出现矛盾。由于车辆结构采取的焊接工艺相对较多, 车辆结构疲劳可靠性、结构焊接疲劳和概率疲劳设计也成为当前现代车辆结构设计的研究内容和发展趋势。无论是高速列车, 还是传统意义上的机车车辆、地铁车辆、客运和货运车辆, 其关键结构部件基本可以分为轮对 (车轴、车轮)、构架、车体以及传动和悬挂部件等。这些关键部件中, 车体和转向架构架均属于重要的焊接结构部件, 结构疲劳的失效问题相对发生较多。尤其是随着轨道车辆运营速度的不断提高, 轮轨间作用的动载荷的幅值随之增大, 各结构部件的力传递关系由于车辆非线性因素的影响出现各种复杂变化, 导致车辆结构振动状态随时有可能恶化, 对车辆结构随机振动的疲劳寿命研究也就变得极为必要和迫切。

随着多体动力学和有限元技术的发展, 随机动载荷作用下的结构疲劳仿真设计和寿命预测已经成为现代轨道车辆结构疲劳研究领域的一项重要的发展趋势和有效的解决方案。这也就需要理解结构振动疲劳研究的一些关键因素: 载荷时间历程、结构几何特征和材料特性等。随时间变化的载荷历程 (包括惯性载荷和支反力作用载荷等), 经常被称为载荷时间历程, 可以用来表示结构某一时段的随机变幅载荷。由于载荷时间历程的变化, 材料试件或结构部件的材料内部就会产生随着时间变化而产生的交变应力或应变, 这些产生的交变应力或应变又称为应力历程或应变历程 (Dynamic Stress or Strain Histories), 简称为动应力或动应变。

由于车辆结构疲劳研究涵盖的范围太广, 涉及到车辆工程结构的各个领域, 本书研究范围限定于讨论现代轨道车辆结构部件的疲劳寿命预测和耐久性分析方法。为了强调本书的研究重点, 本书内容从多体系统动力学和有限元法的角度, 特别是车辆系统动力学和结构疲劳设计的角度分析车辆结构关键部件的振动疲劳和寿命预测问题。如何利用多体动力学和有限元法的混合模拟技术进行车辆结构疲劳寿命预测的仿真方法研究是本书阐述的核心。本书借鉴国内外各行各业结构有限元疲劳研究的最新成果和经典车辆结构疲劳寿命预测方法的阐述方式, 结合作者多年来对结构疲劳研究的深刻体会, 将系统和分层次地介绍如何基于多体动力学和有限元法的混合模拟技术研究车辆结构部件的疲劳寿命, 并以实际算例进行详细阐述。书中采用的工程实例来自于作者近年来主持的国家级和省部级相关轨道车辆关键部件结构疲劳研究的项目。

国内外铁路机车车辆专家学者对车辆关键结构的部件都展开了广泛研究, 取得了很多有效的成果。图 1.3 所示为铁路车辆的车轴结构疲劳断裂和裂纹萌生的基本现象。图 1.4 为铁路车辆关键部件轮对出现的疲劳裂纹现象。在结构疲劳破坏