

WILEY

车辆耐久性载荷分析导论

[瑞典]帕·约翰内森 (Pär Johannesson) 编
[德]迈克尔·施柏科特 (Michael Speckert)

王 涛 金 毅 王大方 译

GUIDE TO LOAD ANALYSIS FOR
DURABILITY IN VEHICLE ENGINEERING

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

WILEY

车辆耐久性载荷分析导论

[瑞典]帕·约翰内森 (Pär Johannesson) 编
[德]迈克尔·施柏科特 (Michael Speckert)
王 涛 金 毅 王大方 译

GUIDE TO LOAD ANALYSIS FOR
DURABILITY IN VEHICLE ENGINEERING

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

车辆耐久性载荷分析导论/(瑞典)帕·约翰内森 (Par Johannesson), (德)迈克尔·施柏科特 (Michael Speckert) 编; 王涛, 金毅, 王大方译. —北京: 北京理工大学出版社, 2017. 11

书名原文: Guide to load analysis for durability in vehicle engineering
ISBN 978 - 7 - 5682 - 2897 - 8

I. ①车… II. ①帕…②迈…③王…④金…⑤王… III. ①汽车 - 耐用性 - 载荷分析 IV. ①U461. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 193845 号

北京市版权局著作权合同登记号图字: 01 - 2016 - 2460

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Beijing Institute of Technology Press Co., LTD and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京通州皇家印刷厂

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 27

彩 插 / 4

字 数 / 472 千字

版 次 / 2017 年 11 月第 1 版 2017 年 11 月第 1 次印刷

定 价 / 146.00 元

责任编辑 / 梁铜华

文案编辑 / 梁铜华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

关于编者

Pär Johannesson (SP 瑞典国家技术研究所, 瑞典), 1999 年获得隆德理工学院数学统计学博士学位, 论文内容是研究疲劳的统计载荷分析。2000 年和 2001 年, 作为博士后, 在查尔姆斯对 PSA 标致雪铁龙进行数学统计研究, 在巴黎对汽车进行了一年的创新研究。2002—2010 年, 作为弗劳恩霍夫查尔姆斯研究中心的研究员在哥德堡对工业数学进行研究, 2010 年, 成为查尔姆斯的特邀研究员。目前是 SP 瑞典国家技术研究所的研究工程师, 主要对载荷、可靠性方法和疲劳方面的项目进行研究。

Michael Speckert [弗劳恩霍夫工业数学研究所 (ITWM), 德国], 1990 年获得凯泽斯劳滕大学的数学博士学位。1991—1993 年, 在 TECMATH 的人体建模部门工作, 研究优化算法。1993—2004 年, 在 TECMATH 和 LMS 的部门工作, 进行载荷数据分析、疲劳寿命评估与软件的开发。自 2004 年以来, 作为 ITWM 的应用研究员, 一直在动力学与耐久性部门工作。主要兴趣领域是统计学、面向疲劳的载荷数据分析和多体仿真技术。

参与编写者

Klaus Dressler [弗劳恩霍夫工业数学研究所 (ITWM), 凯泽斯劳滕, 德国], 1988 年获得凯泽斯劳滕大学的数学物理学博士学位。1990—2003 年, 为 TECMATH 和 LMS 国际公司汽车产业的载荷数据分析和模拟软件开发做出贡献。在此期间, 发起并组织了一个与德国汽车“客户关系”有关的“载荷数据分析”合作工作组, 包含的公司有奥迪、宝马、戴姆勒、保时捷和大众。自 2003 年以来, 一直担任 ITWM 动力学和耐久性部门的经理, 与 35 位研究员进行载荷数据分析和仿真专题的工作, 还负责协调弗劳恩霍夫创新群的“商用车技术”, 使得像戴姆勒、约翰迪尔、沃尔沃、利勃海尔这样的公司与德国弗劳恩霍夫研究所合作使用差异性与虚拟产品开发的项目。

Jacques de Maré (查尔姆斯理工大学和哥德堡大学数学科学系, 哥德堡, 瑞典), 1975 年获得隆德大学数学统计学博士学位。1976—1979 年工作于瑞典于默奥大学, 之后工作于查尔姆斯理工大学, 并于 1995 年成为教授。1982 年在北卡罗来纳大学担任客座研究员; 1989 年, 在圣巴巴拉的加州大学担任客座研究员; 2004 年, 在日本福岡的九州大学担任客座研究员。国际统计学会会员, UTMIS (瑞典疲劳网络) 的创始人之一, 并且是首届董事会的成员。目前, 与 SP 瑞典国家技术研究所材料疲劳统计法方面进行合作。在查尔姆斯, 以不同的方式将数学和工程学科更加紧密地联系在一起。

Sara Loren (布罗斯大学工程学院, 布罗斯, 瑞典), 2004 年获得查尔姆斯理工大学数学统计学博士学位, 论文题为“疲劳极限、容差和有限寿命: 统计学观点”。2005—2010 年, 作为弗劳恩霍夫查尔姆斯研究中心工程数学方面的应用研究员, 研究应用材料疲劳的统计方法。目前在布罗斯大学工程学院工作。

Nikolaus Ruf [弗劳恩霍夫工业数学研究所 (ITWM), 凯泽斯劳滕, 德国], 在凯泽斯劳滕大学学习数学。2002 年, 获得优化设计数学学位。2008 年, 获得自然科学博士

学位，研究雨流时间序列的统计模型。自2008年起，成为ITWM的研究员，对技术体系测量数据进行分析，特别是针对耐久性、可靠性以及车辆和其子系统的效率问题。

Igor Rychlik（查尔姆斯理工大学和瑞典哥德堡大学数学科学系）是查尔姆斯理工大学数理统计学教授。1986年获得博士学位，论文题目是“疲劳应用中的统计波分析”。他的主要研究兴趣是疲劳分析、波浪气候建模和随机过程理论的一般工程应用，尤其是对结构与环境交互的安全性分析，如通过风压、海洋波浪或温度变化。在国际杂志发表论文50余篇，是教材《概率和风险分析》的作者之一。他曾担任多所大学客座教授，其中包括科罗拉多州立大学统计系、北卡罗来纳大学教堂山分校随机过程中心、伊萨卡康奈尔大学应用数学中心、澳大利亚布里斯班昆士兰大学数学系。

Anja Streit [弗劳恩霍夫工业数学研究所 (ITWM)，凯泽斯劳滕，德国] 在2006年获得凯泽斯劳滕大学数学博士学位，论文题目是“分子动力学仿真中不同长度尺度的耦合”。自2007年以来，一直担任弗劳恩霍夫技术经济数学研究所动态性和耐久性部门应用研究员。她的主要工作领域是统计和面向疲劳载荷数据分析。

Thomas Svensson (SP 瑞典国家技术研究所，布罗斯，瑞典) 在2016年获得查尔姆斯理工大学数学博士学位，论文题目是“疲劳寿命在线预测的统计学方法”。1990—2001年，SP 瑞典国家技术研究所研究工程师；2001—2007年，工作于弗劳恩霍夫查尔姆斯工业数学研究中心；2007年，返回SP 瑞典国家技术研究所继续工作。自2010年以来，担任查尔姆斯理工大学数理统计系兼职教授，也是工程材料结构疲劳和断裂杂志社编委会成员。自2008年起，担任UTMIS（瑞典疲劳网络）主席。

丛书前言

在全球行业中，汽车行业是最大的制造业之一。不仅因为它为全球带来的明显经济效益，同时汽车与各种各样的国际问题紧密相关，如能源消耗、排放、贸易和安全。

汽车系列丛书的主要目标是为工业研究员和从业者，以及车辆工程的本科生与硕士生出版实用且有针对性的书籍。该丛书发表的汽车行业的最新技术，为发展燃料利用的高效性、安全性，以及环境友好型汽车提供了技术支持。它涵盖了多种主题，包含设计、制造和操作，旨在为汽车行业从业者提供相关信息来源。

在2006年，欧洲六大卡车制造商（达夫、戴姆勒、依维柯、曼、斯堪尼亚和沃尔沃）发起了一个研究项目，目的是提供卡车疲劳设计载荷分析指南。该项目由专注于工业数学领域的弗劳恩霍夫查尔姆斯研究中心（FCC）与弗劳恩霍夫ITWM、SP瑞典国家技术研究所、查尔姆斯理工大学数学科学系和行业合作伙伴共同合作进行。

该项目包含载荷分析目前方法和未来需求的调查，以及汽车应用中最先进载荷分析方法的调查。调查结果形成了本书。

本书介绍了一些不同的载荷分析方法，解释了它们的原理、使用、应用程序、优点和缺点。整合载荷分析到汽车设计的部分，旨在提出设计过程中每一阶段适用的方法。

本书的主题涉及疲劳、安全、可靠性、信号处理、概率和统计数据等领域。由各领域内公认专家执笔，是对汽车系列丛书的很好补充。

Thomas Kurfess

2013年8月

前言

本书是致力于载荷分析和耐久性研究的科研人员和从业者合作的成果。他们的专业背景各不相同，包括数理统计、应用数学、力学和疲劳，对载荷分析问题和特定类型的疲劳问题具有行业经验。2006年六家卡车制造商达夫、戴姆勒、依维柯、曼、斯堪尼亚和沃尔沃公司发起了一个面向卡车疲劳设计的研究项目，旨在形成一套载荷分析指南。该项目由弗劳恩霍夫查尔姆斯工业数学研究中心（FCC）与弗劳恩霍夫ITWM、SP瑞典国家技术研究所、查尔姆斯大学数学科学系及多个行业合作伙伴共同完成。参与项目的研究机构均在耐久性载荷分析领域具有丰富的研究经验。其中，瑞典的FCC、SP和查尔姆斯擅长于统计和随机过程方面的研究，而德国的弗劳恩霍夫ITWM是机械系统的数学建模方面的专家。经过多年的努力，该指南于2009年如期完成。

运输车辆在世界不同地区有着迥异的使用工况和运输任务，而制造商又意图实现准确满足用户需求的设计，这种需求被转化为诸如较低的失效风险、恰当的安全因子或者经济的预期寿命等目标。充分了解用户载荷特性，具备良好的材料力学特性知识，对于出色完成设计是至关重要的。

在设计一款性能优异且可靠的产品过程中，不仅零件寿命的预测很重要，关于差异性来源及其对寿命预测影响的研究也很重要。这里主要有两项影响寿命的因素，施加在零件上的载荷和零件的结构强度。统计学方法是描述和量化载荷及强度变化的有力工具。结构强度的差异性取决于材料分散性和构型差异。用户载荷分布可能会受卡车的使用工况、驾驶员的操作行为和市场的影响。

信息技术的发展及其在车辆上的集成使实时监测成为可能；此外，设计过程也已转移到电脑上。这些任务伴随着轻量化设计和燃油经济性的需求，需要我们重新审视载荷分析问题。

在2006年进行了一项为期一年的项目，旨在奠定载荷分析指南的基础。该项目调查了载荷分析方法的现状及未

来需求，同时对汽车领域载荷分析现状进行了调查。

为完善指南，项目组于2007—2009年召开了一系列研讨会。这些研讨会的主题包括载荷分析基础（2007）、载荷分析方法（2008）和车辆设计过程中的载荷分析（2009）。

本书给出了多种载荷分析方法及其在车辆设计过程中的运用。第一部分的概述中，用两章的篇幅介绍了本书涉及的内容。第二部分的载荷分析方法中，介绍了常用方法及其适用场合。在第三部分考虑车辆设计过程的载荷分析中，给出了用户工作载荷的评估策略，尤其是与设计载荷推导相关的客户群的特征化，最后进行系统和零件上的验证。本书还介绍了载荷生成与加速，以及验证试验规划与评估的流程。全书中使用大量案例对方法进行了说明。

据我们了解，目前仍未有类似书籍，但是本书中的大部分结论和方法见诸不同领域的书籍和期刊中。关于耐久性载荷分析部分内容主要在力学、疲劳和车辆设计的期刊及工程材料疲劳相关的书籍中，以及在其他领域的会议和研究论文中，如信号处理、数学和统计学。

本书的读者可能是那些对耐久性设计感兴趣的人，或是高级设计工程师和可靠性专家，尤其是对耐久性、疲劳、可靠性和车辆行业中类似的项目感兴趣的读者。本书有助于设计和试验过程中常用方法和新技术的理解与联合运用。

Pär Johannesson

哥德堡，2013年3月

Michael Speckert

凯泽斯劳滕，2013年3月

致 谢

这本书源于一项由六个欧洲卡车制造商达夫、戴姆勒、依维柯、曼、斯堪尼亚和沃尔沃发起的为期四年的项目（2006—2009）“载荷分析在车辆中的应用指南”。该项目是由弗劳恩霍夫查尔姆斯工业数学研究中心（FCC）与弗劳恩霍夫ITWM、SP瑞典国家技术研究所、查尔姆斯大学数学科学系及行业合作伙伴共同完成的。

我们对提供资金支持和工程应用反馈的行业合作伙伴表示感谢。特别感谢达夫的 Peter Nijman、戴姆勒的 Christof Weber、依维柯的 Massimo Mazzarino、曼的 Manfred Streicher、斯堪尼亚的 Anders Forsen 以及沃尔沃的 Bengt Johannesson。

同时十分感谢瑞典战略研究基金会通过哥德堡的教学建模中心（GMMC）对瑞典研究小组的支持。

目 录

第一部分 概述

第1章 引文 / 3

- 1.1 车辆工程中的耐久性 / 4
- 1.2 可靠性、差异性、鲁棒性 / 6
- 1.3 卡车的载荷描述 / 7
- 1.4 为什么载荷分析很重要 / 8
- 1.5 本书的结构 / 10

第2章 耐久性载荷 / 13

- 2.1 疲劳与载荷分析 / 13
 - 2.1.1 等幅载荷 / 13
 - 2.1.2 块载荷 / 14
 - 2.1.3 变幅载荷与雨流循环 / 14
 - 2.1.4 雨流矩阵、穿级和载荷谱 / 16
 - 2.1.5 其他类型的疲劳 / 19
- 2.2 疲劳设计中的载荷问题 / 20
 - 2.2.1 疲劳寿命: 累积损伤 / 21
 - 2.2.2 疲劳极限: 最大载荷 / 21
 - 2.2.3 突发失效: 最大载荷 / 21
 - 2.2.4 与安全相关的关重件 / 21
 - 2.2.5 航空设计中的相关概念 / 22
- 2.3 系统响应中的载荷问题 / 22
- 2.4 载荷差异性 / 24
 - 2.4.1 不同类型的差异 / 24
 - 2.4.2 不同环境的载荷 / 25
- 2.5 小结 / 27

第二部分 载荷分析方法

第3章 载荷分析基础 / 31

- 3.1 基于幅值的方法 / 33

- 3.1.1 从外部载荷到局部载荷 / 34
- 3.1.2 载荷信号的预处理 / 35
- 3.1.3 雨流循环计数 / 38
- 3.1.4 范围 - 对计数 / 47
- 3.1.5 Markov 计数 / 49
- 3.1.6 范围计数 / 51
- 3.1.7 穿级计数 / 52
- 3.1.8 区间穿级计数 / 53
- 3.1.9 不规则因子 / 53
- 3.1.10 峰值计数 / 53
- 3.1.11 计数方法对比举例 / 54
- 3.1.12 伪损伤和等效载荷 / 60
- 3.1.13 旋转件的处理方法 / 64
- 3.1.14 建议与工作流程 / 67
- 3.2 基于频率的方法 / 69
 - 3.2.1 功率谱密度函数和周期图 / 70
 - 3.2.2 基于周期图的谱估计 / 71
 - 3.2.3 谱图与雨流图 / 76
 - 3.2.4 基于频率的系统分析 / 76
 - 3.2.5 极限响应谱与疲劳损伤谱 / 81
 - 3.2.6 小波分析 / 83
 - 3.2.7 基于幅值方法和基于频率方法的关系 / 83
 - 3.2.8 更多的举例和总结 / 84
- 3.3 多输入载荷 / 88
 - 3.3.1 从外部载荷到局部载荷 / 89
 - 3.3.2 雨流投影 (RP) 法 / 90
 - 3.3.3 绘制伪损伤图及示例 / 93
 - 3.3.4 等效多输入载荷 / 96
 - 3.3.5 多输入载荷的相位绘制及相关性矩阵 / 97
 - 3.3.6 多输入水平计数时间 / 101
 - 3.3.7 双轴图 / 102
 - 3.3.8 Wang - Brown 多轴循环计数方法 / 102
- 3.4 小结 / 103

第4章 载荷编辑与时域信号生成 / 104

- 4.1 引文 / 104
 - 4.1.1 载荷基本特性 / 105
 - 4.1.2 等效准则 / 105
- 4.2 数据检查与修正 / 107
 - 4.2.1 示例与数据检查 / 107
 - 4.2.2 发现与修正 / 109
- 4.3 载荷的时域编辑 / 112
 - 4.3.1 基于幅值的时历信号编辑 / 112
 - 4.3.2 基于频率的时历信号编辑 / 122
 - 4.3.3 带频率约束的基于幅值的编辑 / 132
 - 4.3.4 时历信号编辑——小结 / 133
- 4.4 雨流域载荷编辑 / 134
 - 4.4.1 缩放 / 135
 - 4.4.2 叠加 / 136
 - 4.4.3 长度或试验周期的外推 / 138
 - 4.4.4 极值外推 / 145
 - 4.4.5 一维计数结果的载荷编辑 / 148
 - 4.4.6 小结、提示与建议 / 149
- 4.5 时历信号的生成 / 150
 - 4.5.1 基于幅值或循环的时历信号生成 / 150
 - 4.5.2 基于频率的时历信号生成 / 157
- 4.6 小结 / 160

第5章 机械系统的响应 / 163

- 5.1 机械系统概述 / 163
 - 5.1.1 多体模型 / 165
 - 5.1.2 有限元模型 / 166
- 5.2 针对耐久性应用的多体仿真 (MBS): 从系统载荷到零件载荷 / 167
 - 5.2.1 案例分析 / 167
 - 5.2.2 建模的一般概念 / 169
 - 5.2.3 多体仿真中的柔性体 / 172
 - 5.2.4 悬架模型仿真 / 174

- 5.3 针对耐久性应用的有限元模型 (FEM): 从零件载荷到局部应力应变历程 / 181
 - 5.3.1 线性静态载荷和准静态叠加 / 182
 - 5.3.2 线性动态问题和模态叠加 / 183
 - 5.3.3 从位移解到局部应力应变 / 185
 - 5.3.4 局部应力应变历程计算总结 / 186
- 5.4 系统恒定载荷 / 187
 - 5.4.1 数字化路面和轮胎模型 / 188
 - 5.4.2 恒定替代载荷的回推 / 190
 - 5.4.3 示例 / 192
- 5.5 小结 / 194
- 第6章 随机载荷模型 / 196**
 - 6.1 引文 / 196
 - 6.2 随机过程基础 / 199
 - 6.3 估计载荷严重度的统计学方法 / 202
 - 6.3.1 外推法 / 202
 - 6.3.2 范围-对分布的拟合 / 203
 - 6.3.3 半参数法 / 206
 - 6.4 蒙特卡洛算法 / 208
 - 6.5 高斯载荷的期望损伤 / 210
 - 6.5.1 平稳高斯载荷 / 211
 - 6.5.2 均值恒定的非平稳高斯载荷 / 215
 - 6.6 非高斯载荷: 上穿级强度的作用 / 216
 - 6.6.1 Bendat 窄带近似 / 216
 - 6.6.2 Bendat 法概述 / 217
 - 6.6.3 拉普拉斯过程 / 220
 - 6.7 损伤变异系数 / 222
 - 6.7.1 拆分被测信号 / 222
 - 6.7.2 短信号 / 224
 - 6.7.3 高斯载荷 / 224
 - 6.7.4 复合泊松过程: 坑洼道路 / 225
 - 6.8 Markov 载荷 / 228

- 6.8.1 Markov 链 / 233
- 6.8.2 离散 Markov 载荷的定义 / 234
- 6.8.3 拐点的 Markov 链 / 236
- 6.8.4 Markov 链载荷的切换 / 237
- 6.8.5 高斯载荷的期望损伤的近似 / 240
- 6.8.6 Markov 载荷的区间上穿级强度 / 241
- 6.9 小结 / 242
- 第 7 章 载荷变化及可靠性 / 244**
 - 7.1 载荷变化性的建模 / 244
 - 7.1.1 载荷变化的来源: 统计总体 / 245
 - 7.1.2 可控或不可控的变化 / 245
 - 7.1.3 模型误差 / 246
 - 7.2 可靠性评估 / 247
 - 7.2.1 统计模型的复杂性 / 247
 - 7.2.2 物理模型的复杂性 / 248
 - 7.3 全概率模型 / 249
 - 7.3.1 蒙特卡洛模拟 / 249
 - 7.3.2 全概率方法的准确性 / 253
 - 7.4 一阶矩方法 / 253
 - 7.5 二阶矩方法 / 254
 - 7.6 疲劳载荷-强度模型 / 255
 - 7.6.1 疲劳载荷和强度变量 / 255
 - 7.6.2 可靠性指标 / 257
 - 7.6.3 等效载荷和强度变量 / 257
 - 7.6.4 不确定度的确定 / 261
 - 7.6.5 损伤指数估计引起的不确定度 / 263
 - 7.6.6 强度不确定度的度量 / 265
 - 7.6.7 载荷不确定度的度量 / 267
 - 7.6.8 可靠性指标的使用 / 268
 - 7.6.9 额外安全系数的引入 / 271
 - 7.6.10 减少不确定度 / 272
 - 7.7 小结 / 273

第三部分 考虑车辆设计过程的载荷分析

第8章 用户载荷评估 / 277

8.1 引文 / 277

8.2 调查抽样 / 278

8.2.1 为什么使用随机样本 / 279

8.2.2 简单随机抽样 / 280

8.2.3 分层随机抽样 / 280

8.2.4 整群抽样 / 280

8.2.5 不等概率抽样 / 281

8.2.6 应用 / 282

8.2.7 简单随机抽样的详情 / 283

8.2.8 结论 / 284

8.3 载荷测量的不确定度 / 285

8.3.1 载荷严重度的精度 / 285

8.3.2 载荷严重度的成对分析 / 290

8.3.3 载荷严重度的联合分析 / 292

8.4 用户的随机抽样 / 293

8.4.1 用户调查 / 293

8.4.2 市场的特征 / 293

8.4.3 新市场的简化模型 / 296

8.4.4 对比用户市场 / 297

8.5 用户使用与载荷环境 / 298

8.5.1 用户使用模型 / 299

8.5.2 载荷环境的不确定度 / 301

8.6 与车辆无关的载荷描述 / 303

8.7 讨论与小结 / 307

第9章 设计载荷的提取 / 309

9.1 引文 / 309

9.1.1 载荷的标量化 / 309

9.1.2 载荷的其他表达方式 / 310

9.1.3 统计学方面问题 / 310

9.1.4	本章的结构 / 311
9.2	从用户任务剖面到设计目标 / 311
9.2.1	用户载荷分布和设计载荷 / 312
9.2.2	强度分布和强度需求 / 312
9.2.3	定义可靠性目标 / 313
9.2.4	载荷-强度模型的局部安全系数 / 315
9.2.5	设计载荷的安全系数 / 316
9.2.6	小结与注 / 318
9.3	合成载荷的模型 / 320
9.4	随机载荷描述 / 322
9.4.1	外部环境载荷建模 / 322
9.4.2	设计过程中的载荷描述 / 323
9.4.3	试验过程中的载荷描述 / 323
9.5	重构方法的应用 / 323
9.5.1	雨流重构 / 323
9.5.2	一维 Markov 重构 / 326
9.5.3	谱重构 / 326
9.5.4	多输入载荷 / 327
9.6	标准化载荷谱 / 328
9.7	试验场道路载荷 / 328
9.8	试验场路径的优化组合 / 329
9.8.1	基于每个通道损伤的优化 / 330
9.8.2	案例分析 / 332
9.8.3	拓展 / 337
9.8.4	提示与应用 / 339
9.9	讨论与小结 / 340
第 10 章	系统和零件验证 / 343
10.1	引文 / 343
10.1.1	验证的原理 / 343
10.1.2	持续改进型试验与产品定型试验 / 344
10.1.3	耐久性验证中的具体问题 / 345
10.1.4	表征试验与验证试验 / 346
10.1.5	不同水平的验证 / 347