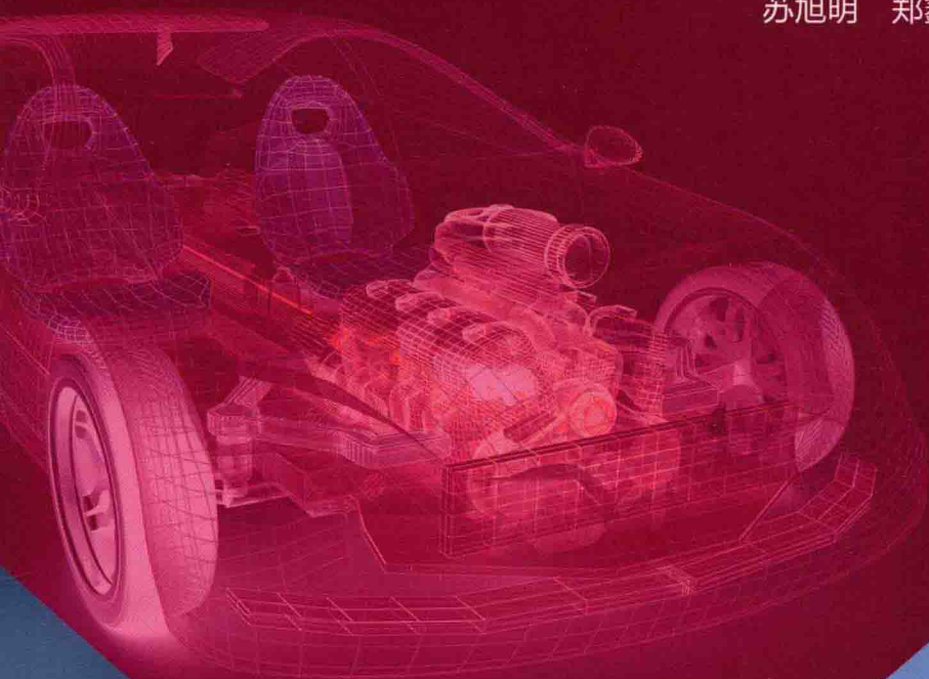


# 汽车设计的耐久性分析

苏旭明 郑鑫 李大永◎编著  
韩维建◎主编



机械工业出版社  
China Machine Press

汽车工程专业系列丛书

1569635

# 汽车设计的耐久性分析

苏旭明 郑鑫 李大永◎编著  
韩维建◎主编



机械工业出版社  
China Machine Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

汽车设计的耐久性分析 / 苏旭明, 郑鑫, 李大永编著; 韩维建主编. —北京: 机械工业出版社, 2016.9

(汽车工程专业系列丛书)

ISBN 978-7-111-54920-8

I. 汽… II. ①苏… ②郑… ③李… ④韩… III. 汽车-耐用性-设计 IV. U461.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 224654 号

## 汽车设计的耐久性分析

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 单秋婷

责任校对: 殷虹

印刷: 三河市宏图印务有限公司

版次: 2016 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 170mm×242mm 1/16

印张: 13.75

书号: ISBN 978-7-111-54920-8

定价: 50.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 68995261 88361066

投稿热线: (010) 88379007

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjg@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

## 丛书总序

中国的汽车产业发展迅速，已经成为我国国民经济的支柱产业之一。随着家庭平均汽车保有量的迅速增长，汽车给整个社会带来的能源、环境、交通和安全的压力日益加大。尽管汽车在轻量化、电动化、排放控制技术和安全技术方面已经有了长足的进步，尤其是近几年互联网和通信技术在汽车的独立驾驶和智能化方向提供了极大的发展和创新的空间，但诸多的发展给汽车产业带来无限的挑战和机遇。因此，行业的快速变化亟需培养一大批不仅懂专业技术，更熟悉跨界知识的创新型人才。

重庆大学汽车协同创新中心认识到人才培养的迫切需求，组织我们为新成立的汽车学院编写一套教材。参与这套教材编写的所有作者都身在汽车行业的科研和技术开发的第一线，其中大部分作者是近年海归的年轻博士。教材的选题经过专家在传统学科和新兴学科中反复地论证和研讨，遴选了汽车行业面临紧迫挑战性的技术和话题。第一批教材有八本，包括《汽车材料及轻量化趋势》《汽车设计的耐久性分析》《汽车动力总成现代技术》《汽车安全的仿真与优化设计》《汽车尾气排放处理技术》《汽车系统控制及其智能化》《中国汽车二氧化碳减排路径》和《汽车制造系统和质量控制》。

这套教材的一个共同特点就是与国际发展同步、内容新颖。编著者对于比较传统的学科，在编写过程中尽可能地把最新的技术和理念包括进去，比如在编写《汽车材料及轻量化趋势》的过程中，不仅介绍了各种轻量化材料的特点和动向，而且强调了轻量化材料的应用必须系统地考虑材料的性能、部件的加工方法和成本。有些选题针对汽车行业发展的新的技术动向，比如《汽车安全的仿真与优化设计》主要介绍汽车安全仿真的模型验证和优化，这是汽车产品

开发采用电子认证的必经之路；而《汽车系统控制及其智能化》概括了汽车的主要系统及其控制，以及智能化技术在各个系统中的应用，这些都是汽车自动驾驶的基础。

这套教材的另一个突出的特点是实用，比如一般汽车设计要求非磨损件的寿命是 24 万公里。《汽车设计的耐久性分析》着重介绍了汽车行业用于耐久性分析的主要工具和方法，以及这些方法的理论基础。这是进行汽车整车和零部件寿命耐久性正向设计的基础。随着环境保护的法规日益严格，汽车排放控制技术也在不断发展提高。汽车动力技术已经形成化石燃料到其他燃料的多元化发展，《汽车尾气排放处理技术》和《中国汽车二氧化碳减排路径》介绍了排放控制技术的进程和法规实施的协调，以及达到法规要求的不同技术路线。汽车质量一直是热门话题，也是一个汽车企业长期生存的关键问题之一。《汽车制造系统和质量控制》介绍了现代汽车制造系统与质量控制的基本概念和实践。

本套丛书不仅对汽车专业的学生大有裨益，也可以作为汽车从业人员和所有对汽车技术感兴趣者的参考读物。由于时间有限，选题的范围还不全面。每本书的内容也会反映出作者的知识和经验的局限性。在此，真诚地希望广大读者提出意见，供我们不断修改和完善。



2016 年 8 月 5 日

## 推荐序一

随着我国汽车工业的快速发展，先进的汽车设计理论和技术在车身开发中越来越受到重视。同时，汽车发展遇到了环保、能源、交通等各个方面的诸多问题，在这种新形势下，从业者掌握和熟练运用核心设计技术显得尤为重要。

汽车的设计与制造是一个非常复杂的系统工程，需要考虑零件、子系统、系统，乃至整车等各个层面，综合运用材料科学、能源科学、信息科学和制造科学的相关知识、理论和方法。本套“汽车工程专业系列丛书”涵盖了汽车制造系统和质量、汽车动力总成、汽车材料及轻量化、车身耐久性、汽车安全仿真与优化、汽车系统控制及其智能化、汽车尾气排放处理与二氧化碳减排等多个方面的内容，涉及汽车轻量化、安全、环保、电子控制等关键技术。

本套丛书的作者既有在汽车相关领域工作多年、有丰富经验的专家，也有学成回国、已崭露头角的后起之秀；内容安排上既有适合初学者学习的大量基础理论知识，也融入了编著者在相关领域多年来的研究体会和经验，从中我们能充分体会到现代汽车技术节能、环保和智能化的发展趋势。丛书结合大量实例，取材丰富、图文并茂。

本套丛书可作为汽车设计的参考工具，也可作为车辆工程、机械工程、环境工程等专业研究生的专门教材及学习参考书。相信该书对于汽车行业相关领域的研究生、企业研发人员和科研工作者会产生重要的启发作用，特作序推荐。



上海交通大学

## 推荐序二

作为《中国制造 2025》战略部署的主要支点之一，汽车业的持续、快速、健康发展将为中国制造业强国目标奠定坚实的基础。面对中国汽车产业大而不强的现状，自主品牌汽车产业的发展壮大时不我待。重庆自主品牌汽车协同创新中心，立足于重庆地区汽车产业，依托国家“2011 计划”，以我国自主品牌汽车发展重大需求为牵引，以体制机制创新为手段，探索我国汽车自主品牌的发展模式。中心面向国内自主品牌汽车产业，重点开展培养高端人才，汇聚优秀团队，研发核心技术，推广产业应用，整合优势资源，搭建交流平台等工作。重庆自主品牌汽车协同创新中心瞄准“节能环保、安全可靠、智能舒适”的国际汽车三大发展趋势，凝练学科发展方向，汇聚创新资源和汽车及相关领域的优势学科群，建立了全面涵盖汽车行业研究领域的创新团队。本套丛书由汽车中心特别顾问、福特汽车亚太区技术总监韩维建博士积极推动。丛书主编韩维建博士基于数十年国际一流汽车工程经验以及独到全面的行业技术趋势把握，整合及组建了编著团队进行丛书各个书籍的编著。编著团队的成员主要由具有多年国际汽车公司工作经验，并且在高校及企业科研一线工作的归国人员组成。丛书内容拥有立足成熟技术、紧跟国际前沿、把握领域创新的特点及优势，丛书的成功出版将为国内汽车行业及学科提供全面而翔实的参考材料。

书籍是知识传播的介质，也是人才培养及创新意识传承的基础。正如重庆大学建校宣言“人类之文野，国家之理乱，悉以人才为其主要之因”所阐释的，本套丛书秉承重庆自主品牌汽车协同创新中心人才培养方针，主要面向高

校汽车相关学科本科及研究生的教学，同时也可作为汽车行业工程人员参考。相信本套丛书会对我国汽车领域学科及行业产生积极良好的推动作用。

Handwritten signature in black ink, consisting of two characters: '刘' (Liu) and '建' (Jian).

江苏省产业技术研究院



# 前 言

汽车是现代人类工作、生活不可或缺的交通工具。作为一种长期承受负荷的产品，汽车整车及其零部件应当具有在较长时间内保持功能正常和良好状态的性能，即耐久性。汽车的耐久性是汽车设计中最关键的要素之一。汽车耐久性失效的根本原因是材料的弱化。材料的弱化可以来自机械载荷，例如汽车的自重和负载引起的结构疲劳以及相互运动零件的磨损，也可以来自热或化学载荷，例如油漆的老化或连接接头的腐蚀。耐久性分析的重点是描述材料的强度特性，记录材料承受的载荷历史，解析并预测材料的失效寿命，据此设计零部件，使其满足相关的设计寿命要求。

本书首先回顾了汽车耐久性分析所需的基础知识，包括材料与材料工艺基础、应力和应变、固体力学基础等方面的基本概念；接着介绍了汽车耐久性的基本失效模式，涵盖断裂与疲劳，蠕变、磨损和腐蚀等，并介绍了车辆的载荷与耐久性试验。车身结构的接头疲劳、发动机缸盖的热机械疲劳以及残留应力的作用是影响汽车耐久性的重要问题，也是作者的研究领域，这些都在本书做了重点讨论。本书最后介绍了两种非常流行的系统的耐久性设计工具，即失效模式与影响分析（FMEA）、鱼骨分析。

汽车的耐久性分析是一门工程学科，是综合性学科，涉及材料、力学、机械、物理和化学等许多领域。因此本书仅是一本基础入门图书。有需要进一步了解细节，并做有关设计的读者，可根据本书的介绍，对相关的学科做更细的研读。

在本书的写作过程中，作者尽最大努力将自己对汽车耐久性分析的理解和多年积累的经验融入文字，并结合工业实际，介绍了诸多分析实例。本书作为

参考书，适合高校相关专业的学生和从事汽车耐久性分析与设计工作的工程师。由于时间仓促和作者的阅历有限，疏漏和不妥之处在所难免，欢迎读者提出批评和修改意见。

作者特别感谢黄诗尧、马秋、石燕栋、黄理、李文凯、孙显俊和陈秋任，他们提供了资料整理和文字校对方面的协助。

苏旭明

# 目 录

|      |  |
|------|--|
| 丛书总序 |  |
| 推荐序一 |  |
| 推荐序二 |  |
| 前言   |  |

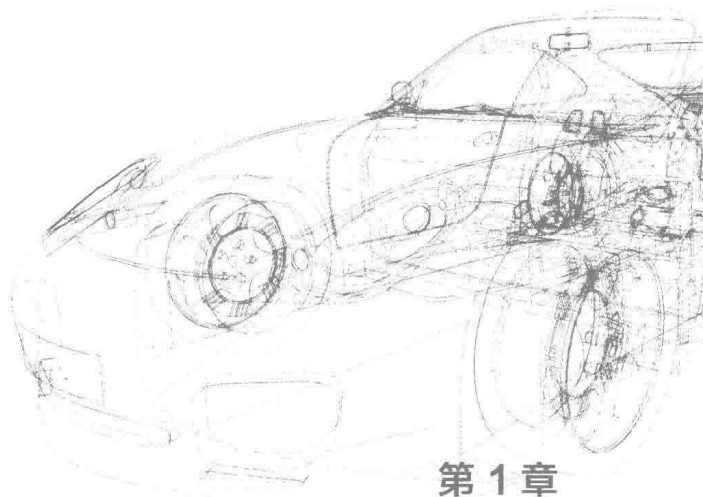
|                      |    |
|----------------------|----|
| 第1章 引言 .....         | 1  |
| 思考题 .....            | 4  |
| 参考文献 .....           | 4  |
| 第2章 材料与材料工艺基础 .....  | 5  |
| 2.1 应力-应变曲线 .....    | 6  |
| 2.2 金属的理论屈服强度 .....  | 10 |
| 2.3 材料的缺陷与位错 .....   | 12 |
| 2.4 材料的硬化机制 .....    | 15 |
| 2.4.1 加工硬化 .....     | 16 |
| 2.4.2 固溶强化和合金化 ..... | 16 |
| 2.4.3 析出硬化 .....     | 17 |
| 2.4.4 晶界 .....       | 17 |
| 2.4.5 相变硬化 .....     | 17 |
| 2.5 聚合物 .....        | 18 |

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| 2.6 高分子复合材料 .....        | 21        |
| 思考题 .....                | 21        |
| 参考文献 .....               | 22        |
| <b>第3章 应力和应变</b> .....   | <b>24</b> |
| 3.1 应力张量 .....           | 26        |
| 3.2 平衡方程 .....           | 32        |
| 3.3 应变张量 .....           | 34        |
| 3.4 协调方程 .....           | 37        |
| 3.5 固体力学的基础方程和边界条件 ..... | 38        |
| 3.6 外力的功和材料的应变能 .....    | 39        |
| 思考题 .....                | 41        |
| 参考文献 .....               | 42        |
| <b>第4章 固体力学基础</b> .....  | <b>43</b> |
| 4.1 线弹性理论 .....          | 44        |
| 4.1.1 弹性常数 .....         | 44        |
| 4.1.2 弹性力学方程 .....       | 47        |
| 4.2 弹性力学的有限元方法 .....     | 52        |
| 4.2.1 泛函与变分法 .....       | 52        |
| 4.2.2 虚功原理 .....         | 54        |
| 4.2.3 里兹方法 .....         | 55        |
| 4.2.4 有限元法 .....         | 57        |
| 4.3 塑性力学 .....           | 61        |
| 4.4 黏弹性力学 .....          | 68        |
| 4.4.1 黏弹性模型 .....        | 69        |
| 4.4.2 三维本构关系 .....       | 71        |
| 思考题 .....                | 71        |
| 参考文献 .....               | 74        |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| <b>第 5 章 断裂与疲劳</b>        | 75  |
| 5.1 韧性断裂                  | 75  |
| 5.2 脆性断裂                  | 77  |
| 5.3 应力集中                  | 78  |
| 5.4 断裂力学和断裂韧度             | 79  |
| 5.5 材料的疲劳                 | 83  |
| 5.6 疲劳载荷与 S-N 曲线          | 85  |
| 5.7 平均应力效应和 Haigh 图       | 88  |
| 5.8 缺口效应和表面粗糙度的影响         | 90  |
| 5.9 低周疲劳与 $\epsilon-N$ 曲线 | 93  |
| 5.10 循环应力-应变曲线            | 95  |
| 5.11 Neuber 方法及局部弹塑性应变的估算 | 99  |
| 5.12 多轴疲劳                 | 100 |
| 5.13 雨流计数法与 Miner 累积损伤定律  | 102 |
| 5.14 疲劳裂纹扩展               | 105 |
| 5.15 统计方法在疲劳分析中的应用        | 107 |
| 思考题                       | 108 |
| 参考文献                      | 110 |
| <b>第 6 章 蠕变、磨损和腐蚀</b>     | 112 |
| 6.1 蠕变                    | 112 |
| 6.2 磨损                    | 118 |
| 6.3 腐蚀                    | 122 |
| 6.3.1 电化学腐蚀               | 124 |
| 6.3.2 点蚀                  | 126 |
| 6.3.3 缝隙腐蚀                | 127 |
| 6.3.4 腐蚀速率                | 127 |
| 6.3.5 腐蚀疲劳                | 127 |
| 思考题                       | 128 |
| 参考文献                      | 129 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| <b>第 7 章 载荷与耐久性试验</b>          | 130 |
| 7.1 整车耐久性试验                    | 131 |
| 7.1.1 公共道路试验                   | 131 |
| 7.1.2 试验场试验                    | 132 |
| 7.1.3 实验室道路模拟试验 (台架试验)         | 133 |
| 7.1.4 计算机辅助耐久性分析方法             | 134 |
| 7.2 零部件、系统级耐久性试验和关键寿命试验        | 135 |
| 7.3 加速试验方法                     | 136 |
| 思考题                            | 137 |
| 参考文献                           | 137 |
| <b>第 8 章 接头疲劳</b>              | 138 |
| 8.1 钢点焊接头的疲劳                   | 139 |
| 8.2 铝合金点焊接头的疲劳 (Yandong, 2013) | 142 |
| 8.3 铝合金粘接接头 (Chen, 2015)       | 147 |
| 8.4 点焊接头的 CAE 模型               | 151 |
| 8.4.1 点焊接头的局部模型及应力分析           | 152 |
| 8.4.2 焊核传递的载荷                  | 153 |
| 8.4.3 基于等效应力的疲劳数据关联            | 154 |
| 思考题                            | 157 |
| 课程设计                           | 157 |
| 参考文献                           | 158 |
| <b>第 9 章 热机械疲劳</b>             | 160 |
| 9.1 等温疲劳                       | 160 |
| 9.2 高温应力、应变行为                  | 162 |
| 9.3 热机械疲劳                      | 163 |
| 9.4 铸造铝合金发动机汽缸盖的热机械疲劳分析        | 167 |
| 9.4.1 三维疲劳寿命模型                 | 167 |
| 9.4.2 材料本构关系                   | 168 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 9.4.3 热疲劳试验与数值模拟 .....          | 170 |
| 思考题 .....                       | 174 |
| 课程设计 .....                      | 174 |
| 参考文献 .....                      | 174 |
| <b>第 10 章 残留应力</b> .....        | 176 |
| 10.1 热应力 .....                  | 176 |
| 10.2 残留应力 .....                 | 178 |
| 10.3 铸造铝合金发动机缸体的应力 .....        | 182 |
| 10.4 残留应力与缸盖的高周疲劳 .....         | 185 |
| 10.4.1 水淬过程的热分析 .....           | 186 |
| 10.4.2 空气淬火的热分析 .....           | 187 |
| 10.4.3 淬火分析中的材料本构关系 .....       | 188 |
| 10.4.4 汽缸盖的残留应力 .....           | 190 |
| 10.4.5 以残留应力作为平均应力的高周疲劳预测 ..... | 191 |
| 思考题 .....                       | 194 |
| 课程设计 .....                      | 194 |
| 参考文献 .....                      | 194 |
| <b>第 11 章 系统的耐久性设计工具</b> .....  | 196 |
| 11.1 失效模式与影响分析 (FMEA) .....     | 197 |
| 11.1.1 基本术语 .....               | 197 |
| 11.1.2 FMEA 过程 .....            | 198 |
| 11.1.3 处置措施 .....               | 201 |
| 11.1.4 PFMEA 过程 .....           | 202 |
| 11.2 鱼骨分析 .....                 | 202 |
| 11.2.1 过程 .....                 | 203 |
| 11.2.2 历史跟踪方法 .....             | 204 |
| 思考题 .....                       | 205 |
| 参考文献 .....                      | 206 |



## 第1章

# 引言

汽车是一种交通工具，从本质上讲，是用来将人或物品从一个地方运送到另一个地方的工具。对于大多数家庭而言，汽车属于大宗商品，当然期望汽车能够使用比较长的时间。因此，汽车的耐久性，也就是整车，或者其中的零部件长时间保持功能正常和良好状态的性能，是汽车设计中最关键的要素之一。

汽车是用固体材料制造的，在道路上行驶中承受负荷。汽车的耐久性失效主要是材料的失效。结构材料有其固有的强度，即使材料保持原有的结构形式抵抗失效的能力。在长时间载荷作用下，材料强度的减弱是耐久性失效的根本原因。耐久性分析的重点是描述材料的强度特性，记录材料承受的载荷历史，预测零部件的寿命。

图 1-1 描述了所谓的“浴盆曲线”（bathtub curve）。浴盆曲线在工程上被广泛用来描述产品在生命周期内所经历的失效过程。浴盆曲线包含以下三部分：

- (1) 第一部分为早期失效，失效率呈现下降趋势。
- (2) 第二部分为偶然失效，失效率基本保持不变。





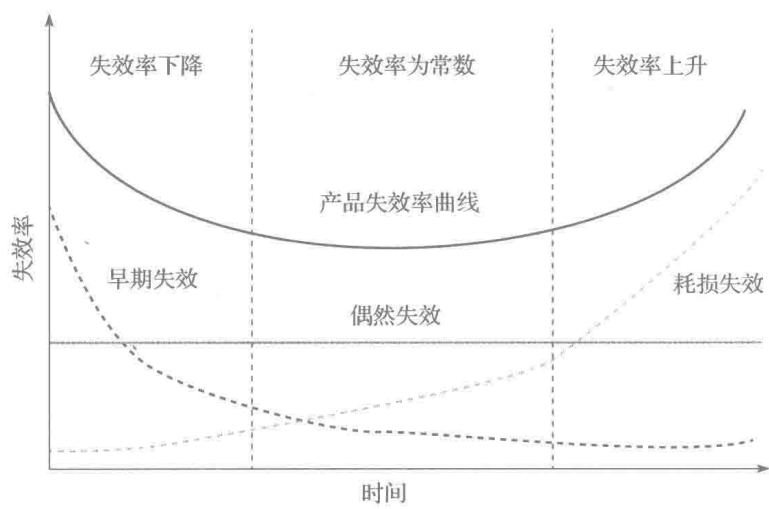


图 1-1 浴盆曲线示意图

(3) 第三部分为耗损失效，失效率呈现上升趋势。

浴盆曲线由早期失效的失效率曲线、偶然失效的失效率曲线（失效率是一个定值），以及耗损失效的失效率曲线叠加形成。

浴盆曲线在最开始阶段的高失效率通常与产品的制造或设计缺陷相关，容易被识别与纠正。偶然失效通常被认为是由于非常规的使用产品，例如超负荷工作或是事故所致。耗损失效意味材料或产品的弱化。事实上，每个产品都有其寿命，或早或晚都会耗损失效。耐久性设计的目的是确保在设计寿命达到之前不发生由于材料弱化造成的耗损失效率增长。

上面已经提到，耐久性失效的根本原因是材料的弱化。充分理解材料性能以及制造工艺对材料性能的影响规律是耐久性设计的基础。材料弱化可以来自机械载荷，例如汽车的自重、负荷以及相互运动零件的磨损；也可以来自热或化学载荷，例如油漆的老化或连接接头的腐蚀。汽车在使用生命周期内的所有载荷都由道路载荷工程师记录并处理，而耐久性工程师的职责是分析这些载荷，估计材料在载荷作用下的失效寿命，并设计零部件使其满足相关的设计寿命要求。

固体力学是一门研究载荷、应力与变形、应变关系的科学。应力与应变同时也是描述材料强度的基本概念，可以用来表征材料的失效。阅读本书的一个前提是要求读者具备一定的材料力学知识。本书虽然不是一本固体力学的专业