

兆文忠 李向伟 董平沙 著

# 焊接结构抗疲劳设计 理论与方法

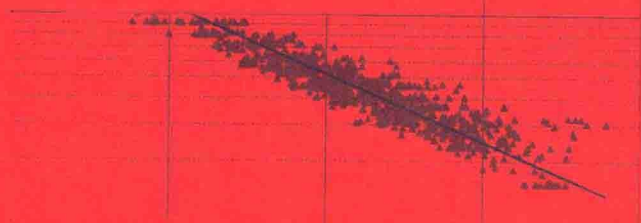
“将一个猜测的游戏变成了可以明确证明的科学”

——美国《时代》杂志这样评价董平沙教授





$$S_s = \frac{1}{r^{(2-m)} \cdot L^m \cdot J(r)^{1-m}}$$



兆文忠 李向伟 董平沙 著

# 焊接结构抗疲劳设计 理论与方法

“将一个猜测的游戏变成了可以明确证明的科学”

——美国《时代》杂志这样评价董平沙教授

第  
一  
章



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

本书介绍了焊接结构疲劳评估的一种方法——结构应力法，其中包括网格不敏感的力学属性以及识别焊缝上应力集中的特殊功能；推导了可评估焊缝疲劳寿命的主  $S-N$  曲线公式；给出了结构应力法在焊接结构抗疲劳设计中的应用技术，其中包括焊接接头应力因数计算技术、识别与缓解应力集中的闭环设计技术、虚拟疲劳试验技术、模态与频域的结构应力技术，以及含初始裂纹的寿命预测技术，并用工程案例给出了应用参照。

书中关于低周疲劳、多轴疲劳以及内涵更深邃的结构应变法的论述则是作者最新研究成果的首次公开。

本书可供从事焊接结构抗疲劳设计相关的人员阅读，也可作为相关的研究生教学与科研参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

焊接结构抗疲劳设计理论与方法/兆文忠, 李向伟, 董平沙著. —北京: 机械工业出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-111-56701-1

I. ①焊… II. ①兆… ②李… ③董… III. ①焊接结构-疲劳强度-设计 IV. ①TG405

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 089800 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 吕德齐 责任编辑: 吕德齐 责任校对: 潘蕊

封面设计: 鞠杨 责任印制: 李飞

北京铭成印刷有限公司印刷

2017 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·12.75 印张·213 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-56701-1

定价: 89.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# 前言

2005年某铁路客车转向架焊接构架上一条焊缝疲劳开裂的事故，就险些瘫痪了那年的中国铁路春运，这件事使我切身体会到：“疲劳隐患就藏在焊接接头的细节之中。”

在很长的一段时期里，焊接结构疲劳强度的理论问题一直很难解决，著名的英国焊接研究所 T. R. Gurney 博士在他 1979 年出版的《焊接结构的疲劳》(Fatigue Of Welded Structures) 专著中也曾这样说过：“实际结构和工程构件的疲劳强度是不能用理论的方法求出来的。”多年后在一次国际会议上，当董平沙教授第一次提出具有网格不敏感特征的结构应力法，并展示了其应用效果时，参会的焊接结构疲劳领域的权威专家最初反应竟然是：“这方法好得不真实甚至反科学”(It's too good to be true and against science!)

然而，世界上一切客观事物的演变都受自身的内在规律所支配，而每个规律的被揭示，都是人们认知客观事物的一次进步，人们认知的局限性终将被超越，这是科学进步的历史必然。对焊接结构疲劳强度理论的认知，也有这样的一个过程。

董平沙教授“十年磨一剑”，基于焊接结构的疲劳失效机理，终于从理论上破解了这个工程界难题，发明了基于结构应力评估焊接结构疲劳寿命的理论与方法。在 2007 年更新后的美国 ASME 标准第 5 章中，基于焊接结构疲劳失效机理而提出的计算模型，使得原本一个很复杂问题的描述，竟然变得就像牛顿定律那样的简洁。2005 年，美国时代杂志在评价他的这一发明时，称其“将一个猜测的游戏变成了可以明确证明的科学”。2015 年，在芬兰赫尔辛基国际焊接学会 (IIW) 第一次设立终身成就奖时，全球仅有五人获此殊荣，而董平沙教授是其中之一，真乃实至名归！

复杂与简单的辩证法就是如此，一个看似相当复杂的问题，看透了实质之后，道理真的很简单。

回想起 2008 年，我带着对传统方法的许多困惑通过电子邮件结识了董平沙教授，十几封往来邮件终于促成了 2009 年 6 月董平沙教授从美国来到大



连交通大学的第一次学术演讲。他不顾时差导致的旅途疲劳，连续五个整天由浅入深的演讲内容令参会者耳目一新，其精彩之处更令我拍案叫绝，也难怪有人会后竟然十分感慨地对我说：“直到今天，才发现原来的前进方向错了。”

而从那一年起，董平沙教授就不断地为我和我的团队带来更新的研究成果与学术思想。这正是：“好雨知时节，当春乃发生，随风潜入夜，润物细无声”。随后几年里，我跟随他数次深入到国内多家轨道车辆制造工厂考察，在他的一次次的答疑解惑中，我渐渐地悟出：焊接结构的疲劳问题本质上应该是一类力学问题，董平沙教授得知我的这一感悟后又添加了三个字：应该是“复杂的”力学问题，这三个字，更是入木三分！

既然是一个力学问题，我就有了点信心，同时也是一种责任感的驱使，我与我的优秀门生李向伟博士（也是董平沙教授的博士后），一起邀请董平沙教授参加本书的撰写，董平沙教授不仅欣然同意，而且还应允贡献出他最新的研究成果。于是在董平沙教授的大力支持下，历时两年，经反复推敲与修改，终于成稿。

构思本书的思路是：以基础知识为铺垫，先进入名义应力领域；然后以焊接结构疲劳问题的特殊属性为导引，迈进结构应力领域。在这个领域内，考虑到结构应力法的重要性，交代了结构应力是如何基于力的平衡理念从非线性应力中被分解出来的，以及结构应力网格不敏感与物理存在的证明。接着以断裂力学理论为工具，详细地介绍了基于焊接结构疲劳失效机理而建立的主  $S-N$  曲线公式的积分演变过程，以及执行该公式的标准步骤。然后考虑到设计阶段的需求，有针对性地推出了几项实用技术，其中包括焊接接头应力因数计算技术、识别与缓解应力集中的刚度协调技术、设计阶段可用的虚拟疲劳试验技术，以及模态与频域的结构应力技术。第 10 章给出的含初始裂纹的寿命预测技术、低周疲劳、多轴疲劳以及内涵更深邃的结构应变法，则是董平沙教授的最新研究成果，最后结合实际案例证明了结构应力法在工程应用中的有效性。

当前，除美国 ASME BPVC VIII-2-2015 标准以外，结构应力法正在被世界上越来越多的国家作为标准来执行，虽然本书的案例大多来自于中国轨道交通装备制造企业，但是本书的核心内容“结构应力法”在焊接结构抗疲劳设计领域是具有理论共性的。结构应力法在国外的应用不局限于轨道交通制造行业，例如法国在 2013 年就基于结构应力法为其船舶与海洋的焊接结构设计颁布了设计指导：《网格不敏感方法应用指南》（Guide for Application of

The Mesh-Insensitive Methodology)。

在国内，以轨道交通装备企业为例，随着高速动车组的“引进、消化、吸收、再创新”，企业的一些决策部门投入了大量的资金购置了疲劳试验设备，建设了一批大型疲劳试验台，在硬件条件上，他们的工作已经与世界接轨，可是在理论接轨这个问题上，他们是否也给予了足够的重视呢？

我国已经规划了《中国制造 2025》，制造大国要转变为制造强国，这就要求我们一定要在内涵更新上下功夫，而在焊接结构抗疲劳设计的内涵更新上，位于上游的理论更新至少与位于下游的试验手段的硬件更新同等重要，只有充分认识到这一点，才能做到真正与世界接轨。

本书共 11 章，其中第 3 章、第 5 章、第 6 章、第 10 章由董平沙教授编写，其余各章由兆文忠、李向伟编写。在编写过程中，大连交通大学的谢素明教授、方吉博士对本书均有贡献。我的另外一名博士——清华大学的崔晓芳博士后参加了本书的审阅，也提出了许多修改建议，在这里一并表示感谢。

最后，还有一点需要特别声明，因认知水平有限，书中内容难免有所疏漏，请读者予以批评指正。

兆文忠

# 目 录

## 前言

第 1 章 引论 .....	1
1.1 焊接结构抗疲劳设计过程中的认识误区 .....	1
1.2 编写本书的基本目的 .....	5
参考文献 .....	6
第 2 章 预备知识 .....	8
2.1 金属疲劳的基本原理 .....	8
2.2 焊接接头的基本术语 .....	10
2.3 焊接结构的疲劳载荷 .....	11
2.4 焊接接头工作应力的定义 .....	13
2.5 $S-N$ 曲线及其内涵 .....	16
2.6 Miner 线性疲劳损伤累积基本理论及其内涵 .....	18
2.7 Paris 裂纹扩展定律与寿命积分 .....	18
2.8 本章小结 .....	21
参考文献 .....	22
第 3 章 焊接结构疲劳强度问题的特殊性 .....	23
3.1 焊接接头的几何不连续性 .....	23
3.2 焊接接头的疲劳破坏模式 .....	24
3.3 焊接接头 $S-N$ 曲线的特殊性 .....	26
3.3.1 母材的屈服强度对焊接接头疲劳强度的影响 .....	26
3.3.2 焊接接头 $S-N$ 曲线具有相同的斜率 .....	27
3.4 焊接接头残余应力对疲劳寿命的影响 .....	28
3.5 本章小结 .....	33
参考文献 .....	33

<b>第 4 章 焊接结构抗疲劳设计与评估的传统方法</b> .....	35
4.1 钢结构的抗疲劳设计与评估标准 .....	36
4.1.1 英国 BS 7608 标准的名义应力法 .....	36
4.1.2 国际焊接学会 (IIW) 的名义应力法 .....	40
4.2 铝结构的抗疲劳设计与评估标准 .....	42
4.3 专用结构的抗疲劳设计与评估 .....	44
4.4 基于热点应力的抗疲劳设计与评估 .....	47
4.5 传统方法的工程应用 .....	50
4.5.1 模块功能设计 .....	50
4.5.2 实施案例 .....	51
4.6 传统评估方法的工程应用局限性 .....	54
4.7 本章小结 .....	57
参考文献 .....	58
<b>第 5 章 结构应力的定义及其内涵</b> .....	60
5.1 有限元方法的基础知识 .....	60
5.2 结构应力的定义与计算 .....	65
5.3 结构应力的力学解释与存在的试验证明 .....	70
5.4 本章小结 .....	74
参考文献 .....	74
<b>第 6 章 主 S-N 曲线</b> .....	76
6.1 基于结构应力的 $K$ 值评估 .....	76
6.1.1 无缺口效应的 $K$ 值求解 .....	77
6.1.2 有缺口效应的 $K$ 值求解 .....	79
6.2 特征深度与缺口应力强度放大因子 .....	80
6.2.1 特征深度 .....	80
6.2.2 缺口应力强度放大因子 .....	80
6.3 两阶段裂纹扩展模型 .....	82
6.4 等效结构应力及主 S-N 曲线计算公式 .....	83
6.5 ASME 标准中焊接结构的疲劳寿命评估 .....	88
6.6 本章小结 .....	91
参考文献 .....	91



<b>第 7 章 焊接接头抗疲劳设计与寿命评估</b> .....	92
7.1 EN15085 的焊接接头设计完整性流程 .....	93
7.2 焊接接头疲劳载荷的获取 .....	95
7.3 获取焊接接头上疲劳载荷的子结构技术 .....	95
7.4 确定应力因数等级的两种技术 .....	99
7.4.1 基于名义应力计算应力因数的具体步骤 .....	99
7.4.2 基于结构应力计算应力因数的具体步骤 .....	102
7.4.3 随机载荷作用时应力状态的确认 .....	105
7.5 本章小结 .....	107
参考文献 .....	108
<b>第 8 章 基于结构应力的虚拟疲劳试验技术</b> .....	109
8.1 应力集中与刚度不协调 .....	109
8.2 基于结构应力的虚拟疲劳试验技术平台 .....	113
8.3 虚拟疲劳试验的实例 .....	116
8.3.1 某轨道货车三轴焊接构架的虚拟疲劳试验 .....	116
8.3.2 某轨道客车转向架焊接构架的虚拟疲劳试验 .....	120
8.4 本章小结 .....	124
参考文献 .....	125
<b>第 9 章 模态结构应力与频域结构应力</b> .....	127
9.1 模态结构应力的定义与计算 .....	127
9.1.1 模态的基础知识 .....	127
9.1.2 模态结构应力的计算公式 .....	130
9.1.3 模态结构应力的计算实例 .....	132
9.2 频域结构应力的定义与应用 .....	135
9.2.1 随机振动基础知识 .....	136
9.2.2 频域结构应力的推导及疲劳评估 .....	139
9.2.3 频域结构应力计算实例 .....	142
9.3 本章小结 .....	147
参考文献 .....	148
<b>第 10 章 结构应力法的最新研究成果</b> .....	149
10.1 剩余寿命评估及等效初始裂纹替代法 .....	149

10.2 多轴疲劳问题的 MLP 法 .....	153
10.2.1 多轴应力状态 .....	153
10.2.2 PDMR 方法 .....	155
10.2.3 MLP 方法 .....	157
10.2.4 MLP 方法的物理解释 .....	159
10.2.5 Sonsino 和 Kueppers 的试验 .....	161
10.3 低周疲劳问题的结构应变法 .....	163
10.3.1 伪弹性应力与 LCF 数据的处理 .....	164
10.3.2 结构应变法与低周疲劳 .....	166
10.3.3 基于 LCF 测试数据的验证 .....	169
10.4 基于等效结构应变参数的统一方程 .....	171
10.4.1 结构应力与结构应变的比较 .....	171
10.4.2 主应变-寿命曲线 .....	172
10.5 本章小结 .....	174
参考文献 .....	175
<b>第 11 章 结构应力法的工程应用案例 .....</b>	<b>177</b>
11.1 SAE “疲劳挑战”案例 .....	177
11.1.1 基于结构应力的焊缝疲劳开裂位置预测 .....	177
11.1.2 基于主 $S-N$ 曲线的焊缝疲劳寿命预测 .....	179
11.2 焊接吊架疲劳隐患成功治理案例 .....	182
11.2.1 应力集中的确认 .....	182
11.2.2 缓解应力集中的对策及有效性验证 .....	183
11.3 焊根疲劳开裂的成功治理案例 .....	186
11.3.1 结构应力的计算 .....	186
11.3.2 改进方案的疲劳强度评估 .....	187
11.4 焊缝疲劳开裂识别案例 .....	190
11.4.1 结构应力计算 .....	191
11.4.2 动应力测试 .....	192
11.5 本章小结 .....	193
参考文献 .....	194

## 1.1 焊接结构抗疲劳设计过程中的认识误区

从结构制造特点的角度看,由于焊接结构具有连接性好、重量轻、易于加工、便于采用自动化生产等优点,在长期承受静态或动态载荷的复杂装备领域得到了广泛应用,特别是焊接工艺技术的不断推陈出新,更是显著地提升了焊接结构在这些产品中的应用地位。但是焊接结构还有不足的一面,即:承受动载荷的焊接接头,由于其几何不连续性而导致应力集中,因而使焊接结构成了产品结构可靠性的薄弱环节之一<sup>[1]</sup>。

面对焊接结构疲劳失效的问题,多少年来包括轨道车辆在内的各个制造行业一直在努力治理,并且取得了一定进展,确保了焊接结构的服役安全,但目前还依然存在一些认识上的误区,如果我们能从这些认识误区中尽快地走出来,效果将可能会更加显著。

**误区一:将金属材料抗疲劳强度设计的理论与方法不加区分地用于焊接结构**

该认识误区是理论层面的。以原铁道部 1996 年颁布的《铁道车辆强度设计及试验鉴定规范》(TB/T 1335—1996)标准<sup>[2]</sup>为例,在这个标准的“车辆主要零部件疲劳强度评估方法”一节中,首先指出:“本方法是铁道车辆主要承载零部件或构件的疲劳分析指南,适用于各型铁道车辆的主要承载件的疲劳评估”,可见该标准的内容并不区分被评估的对象是否为焊接结构。在本书后面也将提到,焊接结构抗疲劳设计的理论与方法和金属材料疲劳强度设计的理论与方法不同,其原因是它们疲劳破坏的机理是有区别的,因此二者不可互相替代。在定义疲劳寿命时,该标准认为疲劳寿命是“构件疲劳

裂纹萌生寿命与裂纹扩展寿命之和”，然而在焊接结构的疲劳开裂过程中裂纹萌生对疲劳寿命的贡献是可以忽略的。

在使用名义应力法时，该标准写明要以材料的  $S-N$  曲线为基础，然而焊接结构的疲劳试验数据已经证明：焊接接头母材的  $S-N$  曲线数据不能替代焊接接头的  $S-N$  曲线数据，其原因也是它们具有不同的力学破坏机理。

在评估疲劳寿命时，该标准使用的是考虑应力比  $R$  的“修正的 Goodman 图”，即认为疲劳强度随不同的  $R$  值变化。后来原铁道部又颁布了《200km/h 及以上速度级铁道车辆强度设计及试验鉴定暂行规定》<sup>[3]</sup>，然而在这个暂行规定中依然将用于金属材料疲劳的理论与方法用于焊接结构。事实上，英国焊接研究所的疲劳试验数据早已证明，修正 Goodman 图用来处理焊接结构的疲劳问题是不恰当的，理由是由于残余应力的存在，平均应力对焊接接头疲劳寿命的影响基本看不到，而金属材料的疲劳则不是这样。

正是由于理论认识上的误导，国内轨道车辆制造工厂的有些设计人员或决策部门在力图提高焊接结构的抗疲劳能力时，常倾向于选用屈服强度高的母材，他们误认为高屈服强度母材的焊接接头的抗疲劳能力也必然高。对于金属疲劳问题，这个观点是成立的，例如文献《抗疲劳设计——方法与数据》中曾用试验数据证明了“材料的疲劳强度与材料的抗拉强度之间有着较好的相关性”，甚至给出了一个近似估算公式<sup>[4]</sup>。然而对于焊接结构来说，该观点是不成立的。英国标准 BS 76081993《钢结构疲劳设计与评估实用标准》<sup>[5]</sup>已经用数据明确证明，标准中所提供的焊接接头的  $S-N$  曲线数据对屈服强度低于 700MPa 以下的结构钢都适用，这就意味着同一焊接接头，只要使用的母材的屈服强度低于 700MPa，例如屈服强度为 345MPa 的 Q345 钢与屈服强度为 435MPa 的 Q435 钢，它们的  $S-N$  曲线数据是没有区别的。关于这一点，国际焊接学会（IIW）在 2008 年的标准中，甚至将这个屈服强度范围提高到了 960MPa<sup>[6]</sup>。

关于这个问题在后面章节中将有较详细的讨论，这里仅简单地给出它的基本理由：疲劳载荷相同、几何形状也相同的焊接接头的抗疲劳能力仅由它产生的应力集中控制，而应力集中的高或低则不由母材的屈服强度控制。

## 误区二：将焊接结构的疲劳失效问题归结为焊接质量问题

该认识误区是责任层面上的，即习惯于将焊接结构的疲劳失效主要归结为焊接质量的问题，习惯于从制造质量的角度寻找问题发生的原因。

在过去很长的一段时间里有过这样的教训，焊接质量很差，焊接缺陷严重而导致一些焊缝在短时间内发生疲劳失效。在吸取质量上的教训之后，现



阶段焊接质量已经有了明显的改善，但是疲劳失效问题还是继续发生，例如图 1-1 所示的某动车组设备舱裙板焊接支架上焊缝的疲劳开裂，就是其中的一个典型案例。经过非常严格的检查未发现该处焊接质量的任何问题，然而服役不久该结构还是出现了疲劳失效问题。这个案例表明：将应力集中产生的原因简单地归结为焊接质量的问题是不恰当的，应力集中可以产生于制造阶段，也可以产生于设计阶段，不同的阶段应该有不同的责任，虽然逻辑上责任问题不是一个科学问题，但是责任不清导致治理上的错位也不可掉以轻心。

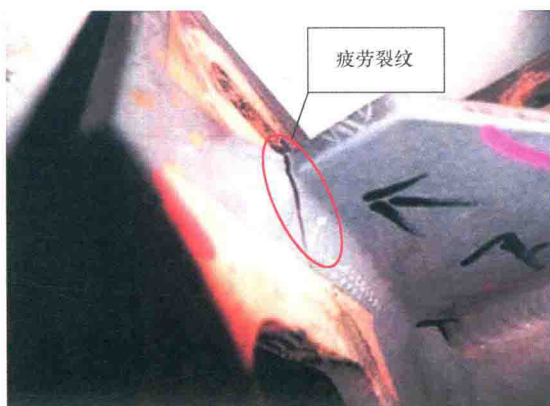


图 1-1 舱裙板支架焊缝疲劳开裂

### 误区三：焊接结构内部的残余应力对疲劳寿命有重要影响

该认识误区是关于焊接残余应力影响的问题，即认为焊接结构内部存在复杂的残余应力，且这个残余应力对疲劳寿命是有重要影响的，可是这个影响究竟有多大又难以可靠估计。

关于焊接结构残余应力本身，国内许多焊接专家的著作中对残余应力产生的机制都有过详细的阐述<sup>[7,8]</sup>，一致认为焊接结构内部存在着相当复杂的残余应力是焊接结构工艺热过程的必然结果。然而在谈到残余应力对疲劳寿命或疲劳失效到底有什么样的影响时，英国焊接研究所的 T. R. Gurney 博士在他的专著《焊接结构的疲劳》中曾有过这样一段精彩的描述：“把焊接结构发生的破坏，归咎于残余应力的影响，这种看法并没有几年，但是最近的研究已经趋向于要证明这种观点是一个误解，即使在某些情况下残余应力无疑会有危害，但它们并不总是要负主要责任。”<sup>[9]</sup>

焊接结构的残余应力峰值可以达到材料的屈服强度<sup>[9]</sup>，由于构件类型、



焊接工艺、装配顺序及夹具等影响，残余应力常表现为复杂的分布形式<sup>[10]</sup>，在进行疲劳评估时，定量计算残余应力的影响在工程上是很困难的，替代的方法是确保疲劳性能测试数据包含残余应力的影响（例如 S-N 曲线数据），这通常要求试件要具有足够的尺寸<sup>[10]</sup>，这在常用的国际规范和标准中，如 EN 标准、BS 标准、IIW 标准及 ASME 标准，S-N 曲线数据中已经包含了残余应力的影响，这样就无须再次单独处理残余应力对疲劳评估结果的影响。

鉴于焊接结构残余应力与疲劳失效的关系是一个争议不断的话题，董平沙教授对此有过更深入的研究并给出了结论<sup>[10]</sup>：“如果有合适的 S-N 曲线数据，残余应力对焊接结构疲劳的影响并不需要单独考虑。”关于这个观点，本书后面的章节中将有较详细的介绍。这里需要强调的是，同样是应力，但是外载荷控制的应力与位移控制的残余应力对裂纹扩展的影响不在一个数量级上，后者远小于前者，如果理解了美国 ASME BPVC VIII-2-2015 中给出的疲劳寿命估算公式的推导过程，残余应力的贡献是几乎看不到的<sup>[11]</sup>。

#### 误区四：对于焊接结构的疲劳问题，只重视验证，不重视设计

该认识误区是逻辑层面上的，即能否用辩证的眼光看待疲劳寿命数值仿真与台架疲劳试验这二者之间的关系。

类似于轨道车辆产品的研发主要阶段是“设计、制造、验证”，可以把这三个阶段比喻为一条河流的“上游、中游、下游”。

由于形成焊接结构的热物理行为相当复杂，致使一些决策者认为疲劳失效隐患存在与否的检查手段只能是台架上的疲劳试验验证。事实上，对台架上疲劳试验的重视确实是非常必要的，但是还应当看到它的“下游”属性，在仅有设计图样的上游设计阶段，如果设计不当，应力集中之类的疲劳隐患就有可能藏匿于其中，一旦发生这种“上游污染”，“下游治理”的代价将是很大的，图 1-1 给出的焊缝疲劳开裂就是典型的“上游污染、下游治理”案例。

当然，焊接结构疲劳寿命的估算结果是概率意义上的统计，由于在数值仿真建模的过程中一些影响因素被简化或忽略，这就导致了仿真计算结果与实际情况的相对误差。但是在建模过程中如果能抓住主要矛盾，基于仿真计算结果的“设计方案相对比较中选优”则有明确的意义，如果计算手段更科学一些，优选出来的设计方案将更有工程价值。例如研究人员曾经为某轨道客车的焊接构架创建了一个计算模型，然后计算得到了 134 条焊缝焊趾上的疲劳损伤，并通过比较识别了哪些焊缝焊趾上的疲劳损伤较大，然后基于识别结果对设计进行了修改。修改以后焊接结构的应力集中得到明显的缓解，

从而实现了这样的设计闭环。如果在设计阶段坚持这样做,“上游应力集中污染”的程度将会显著降低或归零,而要能做到这点,除了要有科学的方法之外,还需要用辩证的眼光看待疲劳寿命数值仿真与台架疲劳试验二者之间的互补关系。

## 1.2 编写本书的基本目的

1981年,徐灏教授在他的专著中指出:“疲劳强度设计”是建立在实验基础上的一门科学<sup>[12]</sup>,对疲劳强度设计问题来说,这个见解无疑是相当深刻的,对于焊接结构的疲劳强度设计问题可能更是这样。1979年,T. R. Gurney博士给出的结论是:焊接结构疲劳强度是不能用理论的方法求出来的,换言之,他认为焊接结构的疲劳强度设计也只能建立在试验基础上。有这种想法的学者还有很多,这也从侧面反映了寻找焊接结构疲劳强度问题的理论解是极其困难的<sup>[9]</sup>。

在焊接结构抗疲劳设计领域,1993年英国提出了BS 7608标准,1998年国际焊接学会(IIW)提出了类似的文件,在包括近年更新的版本中,人们看到的依然是疲劳试验数据的积累,这在一定程度上解决了一系列工程问题,但是实验室试验数据的有限性与工程需求多样性的矛盾依然存在。

然而数学家认为,世界上的事物是有可能用数学方程来描述的,科学的发展验证了这一预言。2007年美国ASME标准进行了更新,在更新版本的第5章中给出了董平沙教授关于焊接结构疲劳寿命评估的理论与方法<sup>[11]</sup>,经过近十年的努力,董平沙教授终于在焊接结构疲劳寿命计算领域实现了数学家的预言。

2015年最新出版的ASME BPVC VIII-2-2015标准,沿用了2007年ASME标准中关于焊接结构疲劳寿命评估的内容。ASME标准的内容是公开的,这为我国密切关注焊接结构疲劳寿命计算理论的人们提供了“引进、消化、吸收、再创新”的窗口,通过这个窗口帮助读者消化其理论,并试图将其转化为解决实际问题的能力,这就成了编写本书的第一个目的。

本书在理论介绍方面遵循的是由浅入深的递进原则,将首先介绍一些相关的基础知识。在讨论焊接结构疲劳失效问题之前,将简要地介绍一些与疲劳相关的基础知识。在讨论S-N曲线内涵的同时,简要地讲解迈纳尔(Miner)疲劳损伤累积原理的内涵。在讨论网格不敏感结构应力之前,简要

地说明一些有限元领域的基础知识。在讨论结构应力法的理论内涵之前，简要地交代一些与断裂力学相关的基础知识，然后重点介绍结构应力法的来龙去脉，以及基于结构应力的主  $S-N$  曲线公式的理论推演。最后，介绍了董平沙教授的最新研究成果，其中包括处理多轴疲劳问题的 MLP 方法、处理低周疲劳问题的结构应变法，以及内涵更深邃的主结构应变法。客观地说，如果我们掌握了这样一个完整的理论体系，处理复杂的工程问题时就不会被复杂的表面现象所迷惑。

当前，我国轨道车辆制造行业还引进了一些其他类似的标准，由于这些标准的疲劳数据是基于名义应力的，因此可将这些标准定义为第一类。美国 ASME BPVC VIII-2-2015 标准中的结构应力法有别于传统的名义应力法，因此将该标准定义为第二类。本书对第一类标准的工程适用性与局限性进行了梳理归纳，基于这个梳理归纳，如果能让读者对第二类标准中新知识的发生过程有个递进的理解，那么编写本书的第二个目的也就达到了。

编写本书的第三个目的是：在理论消化的基础上，试图帮助相关的设计人员在焊接结构的设计阶段有具体的方法可用。无科学的、系统的、简洁的方法可用，一直是设计人员难于开展焊接结构抗疲劳设计的一个紧迫问题，如果这第三个目的能够实现，那么从“发现应力集中”入手，到“缓解应力集中”落脚，从而形成了闭环的设计理念，就不至于像高悬于空中的楼阁。为达到这一目的，本书提供了两类技术，一是服务于接头设计的技术，二是服务于结构系统层面的平台技术。关于接头设计技术，本书将通过欧洲的另外一个标准 EN15085<sup>[13]</sup> 中应力因数的计算为引导，通过具体案例分别给出实施第一类标准与第二类标准的具体步骤，这也是服务于焊接接头抗疲劳设计的参考模板。而关于结构系统层面的平台技术，则是基于结构应力的虚拟疲劳试验理念，本书除了给出虚拟疲劳试验的关键技术之外，还用有代表性的工程案例给出了示范。

本书关于模态结构应力、频域结构应力概念的提出，使结构应力法的工程应用更加广泛，给出的案例让读者进一步认识到，沿着结构应力法的理论路线继续前进，焊接结构疲劳失效问题的学术研究依然有较大的空间。

## 参考文献

- [1] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

- [2] 中华人民共和国铁道部. TB 1335—1996 铁道车辆强度设计及试验鉴定规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
- [3] 中华人民共和国铁道部. 200km/h 及以上速度级铁道车辆强度设计及试验鉴定暂行规定 [S]. 北京: 铁道部科学研究院, 2012.
- [4] 赵少汴. 抗疲劳设计方法与数据 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [5] British Standard Institute. BS 7608: 2014+A1: 2015 Fatigue design and assessment of steel structures [S]. London: BSI, 2015.
- [6] IIW Joint Working Group. XIII-1539-07/XV-1254r4-07 IIW document Recommendations for fatigue design of welded joints and components [S]. Paris: IIW / IIS, 2008.
- [7] 田锡唐. 焊接结构 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [8] 张彦华. 焊接结构原理 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [9] Gurney T R. 焊接结构的疲劳 [M]. 周殿群, 译. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [10] Dong P, Hong J K, Osage D A, et al. The master *S-N* curve method an implementation for fatigue evaluation of welded components in the ASME B&PV Code Section VIII, Division 2 And API579-1/ASME FFS-1 [M]. New York: WRC Bulletin, 2010.
- [11] ASME BPVC VIII-2-2015 ASME Boiler and Pressure Vessel Code [S]. New York: The American society of mechanical engineers, 2015.
- [12] 徐灏. 疲劳强度 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1988.
- [13] European committee standard. EN15085-3: 2007 Railway applications-Welding of railway vehicles and components Part 3: Design requirements [S]. Brussels: European committee for standardization: CEN, 2007.