



钢桁梁桥 评定与加固

——理论、方法和实践

陈惟珍 等著

ASSESSMENT AND STRENGTHENING OF
STEEL TRUSS BRIDGE
THE THEORY, METHOD AND PRACTICE



科学出版社

钢桁梁桥评定与加固

——理论、方法和实践

陈惟珍等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书为作者及其科研团队长达十余年的研究成果和实践经验的总结，也是一本集理论、方法和实践为一体，全面系统论述桁梁桥理论、评定与加固的专门书籍。书中集成了许多国内外研究成果，详细叙述了钢材、钢结构和钢桁梁桥的方方面面，并附有三种典型桁梁桥检测、评定和加固的工程实例，可供同类桥梁工程参考。

本书可供桥梁设计和管理人员使用，也可供相关专业科研人员及高等院校师生参考阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

钢桁梁桥评定与加固：理论、方法和实践/陈惟珍等著. —北京：科学出版社，2012

ISBN 978-7-03-035776-2

I. ①钢… II. ①陈… III. ①钢桁梁桥-综合评定②钢桁梁桥-加固
IV. ①U448.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 242557 号

责任编辑：王 钰 童安齐 / 责任校对：马英菊
责任印制：吕春珉 / 封面设计：耕者设计工作室

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 11 月 第 一 版 开本：787×1092 1/16

2012 年 11 月 第一次印刷 印张：45

字数：962 000

定价：150.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有，侵权必究

举报电话：010-64030229；010-64034315；13501151303

参加本书撰写人员名单

陈惟珍

陈忠延 严博翀 徐俊 谢振林 刘学

序

1874年，美国用刚问世的钢材代替锻铁建造了第一座钢桥，开启了近代钢桥的新时代。桁架分析理论在工程实践需求的推动下日趋成熟，使钢桁梁桥迅速成为19世纪后半叶大跨度桥梁的主流桥型，并从简支钢桁架桥逐步发展到带挂孔的悬臂桁梁桥，跨度也不断增大。1890年建成的苏格兰福思铁路桥，其跨度已超过500m，是19世纪钢桁梁桥的杰出代表。

第二次世界大战结束后，作为现代桥梁标志性新技术的预应力混凝土、钢箱梁和斜拉桥的成功发展使钢桁梁桥逐渐退出了公路桥梁的领域。然而，在铁路桥梁和公铁二用桥梁方面，由于在刚度上的优势，钢桁梁桥仍是首选桥型，也包括采用桁架加劲梁的组合拱桥和斜拉桥，还继续发挥着重要作用。

钢桁梁桥在精心养护下可服务100年以上。许多19世纪建造的铁路桁梁桥至今仍在正常使用。一些钢桁梁桥通过及时评定和适当加固都延长了寿命。我国在1957年建成的第一座钢桁梁桥——武汉长江大桥已服务了50年以上，此后，又建造了许多不同类型的钢桁梁桥。因此，对钢桁梁桥的评定和加固工作应当受到管养部门的关注，以保持其在寿命期内的良好工作性能。

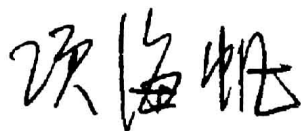
陈惟珍教授1983年毕业于同济大学桥梁专业本科；1986年硕士毕业后留校工作，曾任桥梁CAD研究室副主任；1994年被公派赴德国慕尼黑工业大学做访问学者，后获准转为攻读钢结构方向的博士学位。他的导师Albrecht教授原是波鸿鲁尔大学前副校长Roik教授的学生，1981年，我获得德国洪堡研究奖学金在鲁尔大学做访问教授时，Roik教授也是我的导师之一，当时Albrecht博士是Roik教授的主要助手，我们曾有所交往。

1997年，我去意大利参加欧非风工程会议前顺访慕尼黑，见到了正在攻读博士学位的陈惟珍。他正在做桥梁疲劳与断裂方面的研究，并将其应用于钢桥剩余寿命与安全评定。这是当时欧美强国的研究热点，因为它们在战前30年代和战后60年代的两次建设高潮中所建造的钢桥都已出现了一些问题，急需通过评定和加固保持其工作性能。我鼓励陈惟珍学成回国效力，并告诉他20年后中国也将会面临同样的问题。

陈惟珍教授于1999年获得博士学位后回到同济继续任教，接替陈忠延教授担任钢与组合结构桥梁研究室主任，后因病辞去室主任职务；但他仍坚持工作，悉心指导了多位研究生，其中一位还荣获了全国优秀博士论文奖。2008年起他担任桥梁系桥梁评定与加固研究室主任至今。本书是在他博士学位论文的理论基础上，结合国内十余座钢桁梁桥评定和加固的研究实践以及指导研究生的工作所写成的全面总结。虽然感到篇幅较长，但却凝聚了他自1994年出国以来近20年的心血，是十分难能可贵的。

我相信本书的出版一定会对我国大量现存钢桁梁桥的评定和加固工作起到重要的警示和引导作用，使之能为我国的交通运输事业继续提供安全和健康的服务，并为我国既有桥梁的未来做出贡献。

同济大学荣誉资深教授

Handwritten signature in black ink, reading '项海帆' (Xiang Haiming).

2012年6月

前 言

回首发达国家经济与交通发展历史，在大规模建设之后，新建桥梁开工量就愈来愈少，几乎所有的结构设计师都转变成了维修工程师。我国虽然刚过桥梁建设高峰期，但已建桥梁数目巨大，即将面临大量的评定和维修工作。本书作为一本从理论层面并结合具体桥型来论述的著作，集成了作者及其科研团队和国外学者的研究成果，从材料、构件到结构，从微观、细观到宏观，从古典、经典到现代，从过去、现在到将来深入细致地叙述了有关桁梁桥的各个方面。

我国以往忙于造新桥，对已建桥梁的研究投入甚少，对检测评定的理论和研究方法研究不足，甚至有些方面可能还存在认识误区。为了从理念、趋势和细节一一详解人们心中疑惑、费解之处，本书试图从基本理论出发，一层层揭示钢材、钢结构和钢桁梁桥的内在规律，力求让人细致入微地体会到理论、方法和实践的精微之处。

外白渡桥、钱塘江大桥、武汉长江大桥、南京长江大桥……桁梁桥建造历史可以追溯到久远久远，人们一提起钢桥就是桁梁桥，结构力学的第一堂课就是桁梁计算，二力杆和超静定次数的概念就是源于桁梁，可以说桁梁桥是钢桥理论和实践的源头。几十年来，李国豪院士就在桁梁桥方面做了大量研究工作，他于1951年出版了桥梁工程领域内的第一部由中国人编写的中文教材《钢桥设计》。1973年，李国豪完成了囚室岁月中的专著《桁梁扭转理论——桁梁桥的扭转、稳定和振动》，破解了武汉长江大桥的振动问题和南京长江大桥的稳定问题之疑案，并由此消除了当时中国大桥设计的心病，开拓了桁梁结构的理论分析长河。本书就是借力于前人的肩膀，继承和发展他们的思想脉络，并吸收国外同行的研究经验，期盼建立一套用于钢桁梁桥的检测、评定和加固的完整理论体系和方法。

全书共分11章：

第1章 绪论。详细论述了钢桁梁桥体系、材料、连接以及评定理论研究趋势和有关钢桁梁桥的评定流程。

第2章 钢桁梁桥受力性能和状态模拟。详细叙述了建立钢桁梁桥力学模型的理论和方法，给出了桁梁节点精细分析和杆件锈蚀模拟的理论和方法，提出了两阶段模型修正理论。

第3章 评定荷载及作用效应。详细叙述了公、铁路交通荷载数据的获取和处理，两类荷载模型（极限承载能力荷载模型和疲劳荷载模型）的建立方法，并给出了两类模型作用效应的理论分析方法。

第4章 强度安全评定。叙述了钢材屈服极限的影响因素和强度理论，阐述了桁梁杆件受拉、受弯和受扭时的截面应力计算及依据欧洲规范的强度评定方法，并给出了栓铆连接构造、性能和评定方法。

第5章 稳定安全评定。介绍桁梁桥中杆件屈曲安全评定理论、杆件中的板件和

节点板的翘曲分析理论和方法。

第6章 断裂安全评定。首先深入探讨了钢材断裂机理及其影响因素，接着详细阐述了断裂力学理论和断裂力学参数的数值计算方法，最后叙述了桁梁杆件断裂力学简化模型以及脆断安全评定理论和方法。

第7章 使用寿命和剩余使用寿命预测。在总结现有疲劳分析理论和方法的基础上，着重介绍了基于S-N曲线的唯象学分析方法和基于断裂力学的裂纹扩展分析方法，并叙述了栓铆预紧力对孔边裂纹扩展寿命的影响。

第8章 桁梁桥持续使用对策。详细讨论了疲劳裂纹检测和疲劳安全控制理论和方法，并对桁梁桥具体加固方法做了全面介绍。

第9章~第11章 分别介绍3种典型桁梁桥的检测、评定和加固方法，并就实践过程中的细节问题做了详细解说，供今后实际工程参考。

参加本书撰写的人员及其主要工作有：徐俊撰写了第5章部分内容和第2章部分内容。严博翀撰写了第8.3节，第3章部分内容。陈忠延撰写了第1章部分内容。谢振林撰写了第4章部分内容。刘学撰写了第2章部分内容。其余由陈惟珍撰写。全书由陈惟珍教授定稿。

在此，我要感谢项海帆院士对我回国后科研工作给予的指导和帮助，以及对本书撰写工作的鼓励和支持。

感谢德意志学术交流中心(DAAD)给予本人的奖学金，帮助我在德国攻博期间完成本书的早期理论研究工作，并再次感谢导师Albrecht教授和Kosteas教授对本人博士论文工作的指导，以及Rackwitz教授和Kupfer教授对本人博士论文的指点。

感谢上海市市政工程管理处、天津城建设计院有限公司、山东高速股份有限公司、南昌铁路局等单位对本书实例研究的经费资助和技术支持。感谢上海市交通运输和港口管理局冯健理局长、上海市城乡建设和交通委员会钱寅泉总工、上海市市政工程管理处袁文平总工和商国平总工、天津城建集团韩振勇总工、山东高速股份有限公司刘甲荣总工等项目研究提供了有益的意见。在工程实践过程中，同济大学城市轨道交通与铁道工程系实验室主任李新国高工及其研究团队一直协助项目研究的实桥检测工作，孙宝民、林维正等协助裂纹超声波检测，对他们们的热心帮助深表谢意。

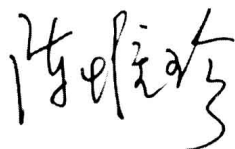
在本书编写过程中，佛山大学刘喜元教授对本书初稿提出了许多有益的修改意见，同济大学声学研究所潘永东教授校对了对8.3节，王艺桥、于振华协助撰写了部分内容并完成了部分校对工作，杨建喜、马诚、古锐、郑勇、刘波、董新玉、武继民、蔡舜尧、赵洋为本书做了文字修改和绘图工作，在此一并表示感谢。

本书参考并引用了一些公开发表的文献和资料，但限于篇幅或者疏漏可能未在书中注明，请予谅解和指正，在此谨向这些作者表示深深的谢意。本书还摘录了王春生博士、谭金华博士、杨光博士的博士学位论文中的部分研究成果以及王志平、徐磊、王硕、金红亮、蒋赢达、徐立、刘兆吉等人的硕士学位论文中部分成果，在此表示感谢。

最后，我要特别感谢上海英谷桥梁科技有限公司董事长韩凯翔先生，在本书撰写

过程中，他邀请编写组成员参观了英谷公司桥梁支座和阻尼器的先进制造工艺流程，并向我们展示了他们拓展桥梁加固产业方面的成绩和长远规划。我们深深地被他们努力造就一流“桥梁医院”的高度社会责任感和使命感所感动，也正是这种使命感让他们对编纂工作给予了持续关注和慷慨资助，才使得本书得以顺利出版。

限于作者水平，书中难免有不妥之处，敬请读者提出宝贵意见和建议，以便在下一版中得到补充修订。



2011年暑假于同济大学桥梁馆

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 历史与发展	1
1.1.1 近代钢桁梁桥的发展及成就	1
1.1.2 现代钢桁梁桥的发展及成就	2
1.1.3 新一代钢桁梁桥的发展特点与趋势	4
1.1.4 我国钢桁梁桥建设的历史与成就	5
1.2 桁梁桥体系分析	7
1.2.1 简支桁梁桥	7
1.2.2 连续桁梁桥	10
1.2.3 悬臂桁梁桥	12
1.3 桁梁桥的钢材与连接	12
1.3.1 钢材	12
1.3.2 钢桁梁桥的连接	16
1.3.3 钢桁梁的节点	18
1.4 钢桁梁桥事故与反思	24
1.4.1 失败中的教训	24
1.4.2 对研究的促进	28
1.5 桁梁桥评定的理论体系	32
1.5.1 桁梁桥评定的基本思想	32
1.5.2 桁梁桥评定框图	35
参考文献	36
第 2 章 桁梁受力性能及状态模拟	37
2.1 概述	37
2.2 桁梁空间有限元分析	37
2.2.1 有限元列式	37
2.2.2 I 阶弹性单元	39
2.2.3 II 阶弹性有限元	44
2.2.4 自振特性分析	51
2.2.5 桁梁有限元模型的建立方法	53
2.3 桁梁节点模拟	64
2.3.1 接触模拟	64
2.3.2 递进单元阶次处理	71

2.3.3	节点开裂的桁梁受力性能	72
2.3.4	小结	74
2.4	杆件锈蚀和补强的模拟	75
2.4.1	钢结构的腐蚀	75
2.4.2	桁杆截面锈损和补强的模拟方法	82
2.5	桁梁桥有限元模型修正	89
2.5.1	主要误差来源分析	89
2.5.2	两阶段模型修正方法	93
	参考文献	97
第3章	评定荷载及作用效应	98
3.1	概述	98
3.2	交通荷载数据的获取及统计	99
3.2.1	公路交通观测与调查	100
3.2.2	多源交通荷载数据获取与处理	101
3.2.3	WIM 系统公路交通荷载数据采集及统计分析	103
3.2.4	BWIM 技术及其在桁梁桥上的应用	113
3.2.5	铁路荷载数据获取及统计	122
3.3	车流模拟及加载	125
3.3.1	Monte-Carlo 方法	125
3.3.2	车流模拟	129
3.3.3	车流加载和应力历程计算	132
3.4	极限承载能力评定荷载	133
3.4.1	我国桥梁设计荷载的演变	133
3.4.2	极限荷载效应外推理论	140
3.4.3	桁梁桥极限承载力评定荷载模型	147
3.5	疲劳评定荷载	150
3.5.1	公路桥梁疲劳评定荷载	150
3.5.2	铁路桥梁疲劳评定荷载	165
3.5.3	疲劳荷载模型的评价	179
3.6	车辆活载极值作用效应	182
3.6.1	方法综述	182
3.6.2	影响面生成方法	183
3.6.3	规范车辆荷载的数字模型	185
3.6.4	影响线加载原理	186
3.6.5	影响线加载改进算法	187
3.6.6	影响面加载原理	189
3.7	疲劳应力谱	194

3.7.1	雨流法计数	194
3.7.2	应力监测与实测应力谱	196
3.7.3	应力谱计算的修正算法	204
	参考文献	205
第4章	强度安全评定	207
4.1	概述	207
4.2	钢材材料强度及其影响因素	207
4.2.1	强度与塑性	207
4.2.2	板厚、温度及应变率对屈服极限的影响	209
4.3	强度理论	213
4.3.1	Tresca 屈服准则	214
4.3.2	Von Mises 屈服准则	215
4.4	杆件截面应力及强度评定	216
4.4.1	受拉杆件	216
4.4.2	受扭构件	222
4.4.3	受弯构件	237
4.4.4	杆件组合受力	247
4.5	栓铆连接及评定	250
4.5.1	栓铆分类及验算要求	251
4.5.2	铆钉和普通螺栓连接	252
4.5.3	高强螺栓	256
4.5.4	栓连接接板	260
4.5.5	连接面上的内力在螺栓群中的分配	262
4.5.6	桁梁桥中各种接头的受力分析	276
	参考文献	289
第5章	稳定安全评定	290
5.1	概述	290
5.2	中心压杆屈曲	290
5.2.1	理想中心压杆屈曲	290
5.2.2	初挠曲对杆件屈曲的影响	294
5.2.3	残余应力对杆件屈曲的影响	295
5.2.4	杆件弯扭屈曲	299
5.2.5	实际中心压杆屈曲安全验算	303
5.2.6	组合压杆的屈曲	306
5.3	压弯杆件屈曲	310
5.3.1	实腹压弯杆件弯曲屈曲	311
5.3.2	压弯开口薄壁杆件的弯扭屈曲	316

5.3.3	压弯杆件双向弯曲屈曲	319
5.3.4	组合杆件的压弯稳定	320
5.4	桁梁桥中板件翘曲	322
5.4.1	平板弹性翘曲	322
5.4.2	平板弹塑性翘曲	325
5.4.3	平板受压翘曲后性能	327
5.4.4	翘曲有效板宽	330
5.4.5	压杆中板件宽厚比的限值	336
5.4.6	节点板的稳定	341
5.5	桁梁杆件的计算长度	342
5.5.1	受压弦杆	343
5.5.2	三角形桁梁腹杆	344
5.5.3	K式桁梁腹杆	345
5.5.4	复式桁梁中的交叉腹杆	345
5.5.5	敞开式桁梁上弦杆	348
5.5.6	门架的稳定问题	349
5.6	桁梁桥整体稳定	353
5.6.1	应用Ⅱ阶理论分析整体稳定性	353
5.6.2	大位移几何非线性整体稳定性分析	355
5.6.3	大位移和弹塑性整体稳定分析	356
5.6.4	桁梁桥整体稳定安全评定	356
	参考文献	356
第6章	断裂安全评定	357
6.1	概述	357
6.2	断裂力学基本原理及断裂判据	358
6.2.1	线弹性断裂判据	358
6.2.2	小范围屈服的 Irwin 修正	360
6.2.3	弹塑性断裂判据	360
6.2.4	失效评定图	363
6.3	应力强度因子与 J 积分的有限元计算方法	367
6.3.1	固体小变形问题的基本方程	367
6.3.2	弹塑性本构关系	368
6.3.3	弹塑性有限元方法	370
6.3.4	应力强度因子与 J 积分的计算	379
6.4	钢材断裂韧性	385
6.4.1	钢材断裂机理	385
6.4.2	延脆转变区钢材韧性试验和分析	388
6.4.3	缺口冲击韧性及其与断裂力学韧性之间的关系	390
6.4.4	影响钢材韧性的重要因素	394

6.4.5 老钢材材料性能	402
6.5 主桁杆件断裂安全评定	411
6.5.1 断裂力学简化分析	412
6.5.2 温度过渡区脆断安全评定	424
参考文献	428
第7章 使用寿命与剩余使用寿命预测	429
7.1 概述	429
7.1.1 疲劳现象和疲劳寿命	429
7.1.2 现有研究疲劳问题的方法	431
7.1.3 影响疲劳寿命的主要因素	434
7.2 基于 S-N 曲线的使用寿命评估方法	440
7.2.1 结构疲劳强度曲线	441
7.2.2 线性损伤累积准则	449
7.2.3 传统疲劳分析中的安全验算	449
7.2.4 基于 S-N 曲线的疲劳寿命计算方法	451
7.3 基于断裂力学的剩余寿命评估方法	453
7.3.1 裂纹扩展机理及描述公式	453
7.3.2 影响裂纹扩展的因素	460
7.3.3 剩余寿命计算	474
7.4 考虑序列效应的裂纹扩展模拟	477
7.4.1 模拟序列效应的各种计算模型	478
7.4.2 裂纹扩展的数值模拟技术	482
7.5 铆钉与高强螺栓预紧力对孔边裂纹扩展的影响	492
7.5.1 栓铆预紧力及抗疲劳性能	492
7.5.2 预紧力作用下孔边裂纹驱动力分析	495
7.5.3 栓孔边裂纹扩展寿命	497
参考文献	498
第8章 桁梁桥持续使用对策	500
8.1 概述	500
8.2 断裂临界杆件及细节	502
8.2.1 断裂临界杆件识别方法	502
8.2.2 疲劳调查优先级	504
8.3 钢桥裂纹的无损检测及尺寸确定	505
8.3.1 钢桥常用无损检测方法	505
8.3.2 无损检测可靠性及 POD 曲线	510
8.3.3 真实裂纹尺寸模糊分布	518
8.3.4 裂纹尺寸确定	519
8.4 疲劳剩余安全度	520
8.4.1 几种可靠度计算方法简介	520
8.4.2 基于传统疲劳理论的可靠度分析	524

8.4.3	基于线弹性断裂力学理论的可靠度评估	528
8.5	疲劳安全控制	537
8.5.1	疲劳目标可靠度	539
8.5.2	裂纹检出概率	540
8.5.3	疲劳安全控制	543
8.6	加固	543
8.6.1	改变结构受力图式的加固方法	544
8.6.2	加强薄弱构件	547
8.6.3	减轻恒载	561
	参考文献	563
第9章	百岁老桥剩余寿命与使用安全研究	566
9.1	概述	566
9.1.1	结构检测与维修历史	567
9.1.2	主要存在的问题	568
9.1.3	研究目标和内容	568
9.1.4	研究技术路线	569
9.2	病害检测	569
9.2.1	锈蚀检测	570
9.2.2	铆钉检测	573
9.2.3	变形检测	574
9.2.4	铆钉孔探伤	576
9.2.5	焊缝探伤	577
9.2.6	小结	580
9.3	试验研究	581
9.3.1	材料试验	581
9.3.2	实桥荷载试验	586
9.4	结构有限元模型及疲劳荷载模型	590
9.4.1	结构有限元模型	590
9.4.2	交通荷载模型	591
9.5	构件损伤程度评估	600
9.5.1	病害统计及其损伤程度评估	600
9.5.2	疲劳损伤评估	607
9.6	强度与稳定安全评定	609
9.6.1	加固改造方案	609
9.6.2	内力与应力计算	609
9.6.3	强度验算	613
9.6.4	杆件稳定验算	614
9.6.5	节点板撕裂验算	615
9.6.6	杆件端部铆钉连接验算	616
9.6.7	小结	617

9.7 剩余使用寿命与检测间隔	618
9.7.1 应力历程与应力谱	618
9.7.2 疲劳寿命	618
9.7.3 检测间隔	618
9.8 结论与建议	621
9.8.1 评定结论	621
9.8.2 加固与养护建议	622
第10章 大跨栓焊钢桁梁桥评定、加固和再评定研究	624
10.1 概述	624
10.2 主要病害及其成因	626
10.2.1 油漆退化与钢板锈蚀	626
10.2.2 疲劳裂纹	626
10.2.3 螺栓松动与缺失	627
10.2.4 永久变形	628
10.3 荷载试验与模型修正	628
10.3.1 实桥荷载试验	628
10.3.2 有限元建模与模型修正	630
10.4 加固前结构强度与寿命评估	632
10.4.1 结构强度验算	632
10.4.2 交通荷载与应力谱	633
10.4.3 寿命评估与检测间隔	636
10.5 维修加固方案及关键部位构造研究	638
10.5.1 加固方案	638
10.5.2 钢桥面板合理构造	642
10.6 车辆荷载谱与轴载谱	645
10.6.1 车辆荷载信息反算结果	646
10.6.2 车轴荷载信息反算结果	648
10.7 加固后结构性能	648
10.7.1 主桁加固效果试验评估	649
10.7.2 结构承载能力与疲劳寿命再评估	650
10.8 结论	662
第11章 铁路桁梁桥疲劳寿命与安全评定研究	663
11.1 概述	663
11.1.1 研究背景	663
11.1.2 赣江大桥概况	663
11.1.3 研究方法与内容	664
11.2 实桥工作状态模拟	665
11.2.1 有限元模型的建立	665
11.2.2 恒载应力	666
11.2.3 计算与实测对比分析	666

11.2.4	小结	673
11.3	应力谱模拟与寿命评估	673
11.3.1	应力谱计算	673
11.3.2	疲劳分析方法	679
11.3.3	累积损伤与剩余寿命	680
11.3.4	小结	682
11.4	H4 节点受力分析	682
11.4.1	概况	682
11.4.2	节点板撕裂强度验算	684
11.4.3	节点板实体有限元模型建立及修正	687
11.4.4	D型车加载分析与比较	689
11.4.5	小结	695
11.5	剩余寿命与检测间隔	696
11.5.1	裂纹检测	696
11.5.2	识别临界构件	697
11.5.3	断裂力学模型	699
11.5.4	剩余寿命与检测间隔	699
11.6	结论与建议	702