

薄壁缺陷结构 及其 可靠性 与安全性

刘 刚 著



人民交通出版社

Robert Guexian Jiebo

薄壁缺陷结构及其 可靠性与安全性

Baobi Quexian Jiegou Jiqi
Kekaoxing Yu Anquanxing

刘 刚 著

人民交通出版社
2002年·北京

内 容 提 要

本专著综合反映了作者在薄壁缺陷结构承载能力及可靠性、安全性方面的理论和研究成果。全书内容计七章,分别为绪论、几何缺陷薄壁箱形结构承载能力的实验研究及数值分析、起重机械的载荷分布性质、基于综合改进的神经网络的结构应力过程统计分析、几何缺陷薄壁箱形结构的可靠度、基于经济可靠度分析的结构优化、基于模糊方法的结构劣化指数及安全性评价与预测。

本书适用于机械、工程力学等类的专业学科,可为研究生和高年级大学生开展结构承载能力研究及可靠性设计时参考或作为教材,也可供广大教师和从事结构承载能力分析及结构可靠性与安全性研究的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

薄壁缺陷结构及其可靠性与安全性 / 刘刚著. —北京:
人民交通出版社, 2002.6
ISBN 7-114-04298-1

I. 薄... II. 刘... III. ①轻型钢结构—结构可靠性—研究②轻型钢结构—结构安全度—研究
IV. TG142.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 037193 号

薄壁缺陷结构及其可靠性与安全性

刘 刚 著

正文设计: 彭小秋 责任校对: 张 莹 责任印制: 杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷有限公司印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 7.25 字数: 181 千

2002 年 10 月 第 1 版

2002 年 10 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—2000 册 定价: 24.00 元

ISBN 7-114-04298-1

TH · 00033

序

工程结构的安全性自古以来就是工程技术人员非常关注的一件大事,但只有到将概率论和数理统计理论引入安全性的研究中,才真正找到了一个统一的方法——结构可靠性分析与设计。目前可靠性理论在结构动力学、疲劳强度与非线性力学等方面已经获得了许多应用,随着科学技术的发展,新的理论与方法不断地向结构可靠性理论中渗透,可靠性理论已成为多学科交叉的一门新兴学科。正是由于工程结构可靠性问题是一门涉及许多学科并与工程应用有着密切关系的学科,虽然近十年来已取得不少进展,但仍有许多问题有待各个领域的研究者去探索 and 解决。

结构可靠性与安全性是当前结构设计与寿命评估中的重要课题,也是机械结构安全工作的关键技术问题,特别是具有几何缺陷的机械结构,其重要性显得更加突出。结构的几何缺陷将导致应力集中现象的出现,对于塑性材料,由于材料有良好的应力再分布能力,应力集中并不会直接导致结构的破坏。可是,对于工程结构中常用的钢材,当结构承受交变载荷时,应力集中会导致结构迅速地发生疲劳失效。根据现代结构设计概念,为保证构件在服役期限内安全可靠地工作,必须对缺陷结构的可靠性与安全性进行分析并给出评价方法。本书以“薄壁缺陷结构及其可靠性与安全性”开展这一方面的研究,这无疑在学术上与实际应用上均有重大意义。

刘刚教授的专著《薄壁缺陷结构及其可靠性与安全性》反映了作者在薄壁缺陷结构承载能力及可靠性、安全性方面的理论和研究成果,是作者本人几年来对工程机械结构现代设计方法研究和教学所形成思路的总结。该书结合实际工程结构的特点,通过实测与智能仿真方法,研究了该类结构的可靠性,从可靠度角度出

发,实现了结构概率优化设计,同时提出了结构安全性评价的量化理论与方法,实现了结构安全使用期限的预测。因此该书有其自己的特色和工程特点,它的出版可以说是该方面研究的一个创新性成果。首先,作者对该课题国内外研究现状及有关技术文献进行评述,阐明了研究本课题的意义及其主要内容,并取得若干有创新意义的研究成果。例如,对具有几何缺陷的不同宽厚比的受压箱形构件的承载能力进行了分析,得到几何缺陷与结构有效承载能力的量化关系;将 $Ng-W$ 法、动量项法、自适应法结合在 BP 法中,实现了人工神经网络的综合改进,然后以起重机四连杆臂架系统的主臂架为对象,建立了人工神经网络的训练样本和最佳网络参数,通过实测与仿真,得到了结构可靠性分析所需要的数据;从初始几何缺陷对结构抗力和疲劳极限的影响关系出发,对结构静强度和疲劳强度两方面进行了可靠度分析;提出并实现了基于经济可靠度分析的结构优化分析方法;提出了结构技术性能状态的主要指标,基于模糊理论给出了相应的状态指数和权重的计算方法,得到结构的劣化指数;给出了基于劣化指数的结构安全性评价方法及结构剩余安全使用期限估算的原理与方法,实现了基于模糊理论的机械结构安全性评价与预测。

本书重视理论与实际的结合。书中提出的大部分理论与方法均有工程实例,在“基于综合改进的神经网络的结构应力过程统计分析”、“几何缺陷薄壁箱形结构的可靠度”、“基于经济可靠度分析的结构优化”、“基于模糊方法的结构劣化指数及安全性评价与预测”等方面都给出了详细的工程实例。这些实例不仅有效验证了书中所提出的方法,也为工程应用提供了范例。

该书研究内容丰富,理论系统、专业性强,条理清晰、文字流畅。我希望本书的出版有助于工程结构可靠性与安全性方面的研究得到进一步的深入和提高。

中科院院士、东北大学教授 闻邦椿

2002 年 7 月

前 言

薄壁箱形结构广泛应用在机械结构中，其承载能力研究及可靠性分析和安全性评价已经受到国内外的普遍关注。研究具有几何缺陷的薄壁结构的承载能力并将它与可靠性和安全性有机地融合在一起是有创新性的理论意义和工程应用价值的。

具有几何缺陷薄壁结构的承载能力通常采用经典力学中的非线性大挠度理论求解，或采用实验方法寻求其规律；结构的可靠性分析则将载荷、材料强度、结构尺寸等都作为服从于某种概率分布的随机变量，应用概率论、数理统计和干涉理论求出构件在一定条件下不产生破坏的概率；结构安全性评价虽然在理论和方法上还没有独立为一个学科分支，但对它的研究与应用已经成为工程界的一个热点。国内外在上述方面的研究取得了很快的进展，并在相应的数学基础理论和分析手段上取得巨大进步。然而，结构承载能力及可靠性与安全性分析与评价的研究虽然已受到工程界的重视并取得一定成果，但从整体上看仍有许多工作要做。

在这种背景下，本书针对大型机械之一的起重机械的特点，研究了具有几何缺陷的结构承载能力及其可靠性分析与安全性评价的理论与方法。本文的基本内容有几何缺陷受压薄壁箱形结构承载能力的实验研究及数值分析、起重机械的载荷分布性质、基于综合改进的神经网络的结构应力过程的统计分析、几何缺陷结构强度的可靠度、基于经济可靠度分析的结构优化、基于模糊方法的结构劣化指数及安全性评价与预测等。以上研究内容具有一定的理论性和应用性，符合现代设计的思想，是机械领域的一个热点方向。

全书共有七章。第一章为绪论,综述了国内外的研究及应用情况,分析了目前结构可靠性和安全性研究存在的主要难点,介绍了本书的主要内容。第二章找出了几何缺陷下不同宽厚比的箱形构件对其承载能力的影响规律和量化关系,为研究几何缺陷对结构抗力和结构疲劳极限的影响规律打下基础。第三章从起重机械的载荷谱开始,对它们在吊重过程的载荷幅值、极值分布进行了归纳和分析;讨论了分布的泊松流性质;对吊重载荷过程的分析模型及数理统计进行了论述。第四章通过把初始权重随机化的 $Ng-W$ 法、动量项法、自适应法结合在 BP 法中,实现了人工神经网络的综合改进,获得了较优的网络结构参数;通过实测与仿真相结合,获得了结构可靠性分析所需的结构受载分布数据。第五章从概率分布的角度建立了初始几何缺陷对结构抗力和疲劳极限的影响关系,对结构静强度和疲劳强度两个方面的可靠度进行了研究,并给出了应用实例。第六章提出并实现了基于经济可靠度分析的结构概率优化方法,提出了基于实测数据和基于计算分析的优化建模方法,并从静强度和疲劳强度两个方面完成了寻求约束下结构最大可靠度的结构优化设计。第七章针对起重机械的特点,提出了结构技术性能状态的主要指标,基于模糊方法给出了相应的状态指数和权重,由此得到结构的劣化指数;根据劣化指数进行结构安全性评价和结构剩余安全使用期限的预测。

全书系统建立了几何缺陷结构的承载能力及其可靠性和安全性分析及评价的理论与方法,从工程应用实际出发,注重理论和实践结合,内容较为丰富,有一定的广度和深度,并力争反映该研究方向的最新进展。虽然起重机械结构在受载、运动和自身构造等方面的复杂性限制了可靠性理论在该类结构分析中的广泛应用,但可以肯定的是,作为一种现代设计理论与方法,它在工程结构分析中的地位愈来愈重要,其应用前景是光明的。

全书在撰写和研究过程中得到了武汉理工大学孙国正教授和顾必冲教授的悉心关怀和指导,书中不少研究结果是在孙国正教

授领导的课题组内完成的;同时同济大学博士后张氢副教授对本书研究内容的完成给予了不少帮助。作者在此对他们致以真诚的谢意。

由于作者的理论水平和实际经验有限,书中难免存在缺点和错误,诚恳希望读者给予批评指正。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 薄壁结构承载能力的研究状况	5
一、薄壁结构承载能力研究的发展与现状	5
二、几何缺陷薄壁结构承载能力的研究	7
三、几何缺陷薄壁结构承载能力的研究方法	9
第三节 可靠性研究的发展概况	10
一、可靠性理论在结构动力、非线性及疲劳分析中的应用	10
二、可靠性理论与多学科交叉的发展概况	11
三、可靠性研究在国内的发展概况	13
第四节 机械结构安全性评价的基本理论与方法	15
一、基于非线性理论和方法的信息综合分析	15
二、基于 CAE 的结构承载能力评价	18
三、基于微观分析的结构件组织与性能评价	18
四、基于实测分析的结构状态综合评价与预测	19
第五节 结构可靠性分析与安全性评价存在的主要难点	19
第六节 本书的主要内容	21
参考文献	24
第二章 几何缺陷薄壁箱形结构承载能力的实验研究及数值分析	38
第一节 概述	38
第二节 分析的理论依据	39
第三节 实验方法	40

一、实验装置	40
二、实验方法	43
第四节 实验结果及分析	44
一、缺陷受压板应力分布的一般分析	44
二、应变不均匀度与盆谷应力	46
三、初挠度相同、宽厚比不同的情况对结构承载能力的影响	50
四、实验结果分析的几点结论	51
第五节 有效宽厚比曲线的实验获得	51
一、极限状态的确定	52
二、有效宽厚比曲线的形成	52
第六节 实验与数值计算结果的比较	54
一、实验结果	54
二、计算结果	55
三、基本比较及结论	56
第七节 几何缺陷结构承载能力的数值计算分析	57
一、计算模型的建立	57
二、有效宽厚比的获得	59
参考文献	62
第三章 起重机械的载荷分布性质	64
第一节 概述	64
第二节 起重机械的载荷谱系数	64
第三节 载荷过程分布的基本性质及其极值分布与泊松流性质	67
一、载荷、应力及吊重水平位置分布的基本性质	67
二、载荷过程的极值分布	70
三、载荷过程的泊松流性质	71
第四节 载荷过程的马尔可夫过程模型	75
参考文献	79

第四章 基于综合改进的神经网络的结构应力过程

统计分析	80
第一节 概述	80
第二节 BP 神经网络的数学描述及泛化能力	82
一、网络结构与数学模型	82
二、BP 神经网络的泛化能力	86
第三节 综合改进的 BP 神经网络及其实现	87
一、改进的方法及其原理	88
二、网络结构参数的确定原则	92
三、计算的基本过程与程序实现	93
第四节 网络计算与分析	99
一、输入输出样本对的确定	99
二、网络的计算与分析	100
第五节 基于神经网络的参数预报的基本原理与方法	114
一、网络训练样本的预处理	114
二、网络训练后的预报算法	119
三、预报输入矩阵的产生及参数预报	119
第六节 基于实测与预报的结构应力分布参数的统计 分析	121
一、结构应力过程的实测规划与应力项参数的综合	121
二、实测的结构应力分布参数的统计分析	126
三、神经网络预报后结构应力分布参数的综合	127
第七节 起重机臂架结构应力过程统计分析的应用实例	128
一、起重机工作特点及实测工况的确定	128
二、实测方法及实现	129
三、实测结果的初步分析及神经网络训练样本的确定	131
四、神经网络训练结果及预报	139
五、臂架结构应力过程的统计分析	142
参考文献	147

第五章 几何缺陷薄壁箱形结构的可靠度	150
第一节 概述	150
第二节 结构极限状态方程与应力强度干涉理论	150
第三节 可靠指标与一次二阶矩法	152
第四节 几何缺陷结构抗力的概率分布	156
第五节 结构静强度的可靠度计算原理	162
第六节 结构疲劳强度的可靠度计算原理	165
第七节 基于可靠度分析的安全系数法	169
第八节 起重机臂架结构的可靠度	173
一、起重机臂架结构静强度的可靠度	173
二、起重机臂架结构疲劳强度的可靠度	175
参考文献	176
第六章 基于经济可靠度分析的结构优化	178
第一节 概述	178
第二节 设计变量及其随机性	179
第三节 基于经济可靠度的目标函数及约束条件的确定	183
第四节 基于经济可靠度的起重机臂架结构优化	185
一、基于实测数据的结构优化	186
二、基于计算分析的结构优化	189
参考文献	194
第七章 基于模糊方法的结构劣化指数及安全性评价	
与预测	196
第一节 概述	196
第二节 机械结构技术性能状态的主要指标	196
第三节 机械结构技术性能状态的劣化指数	199
一、基于模糊性的状态指数与权重	199
二、权重值的修正	200
三、劣化指数	201
第四节 基于劣化指数的结构状态评价	201

一、基于模糊理论的评价原理	201
二、基于劣化指数的结构状态评价	202
第五节 基于劣化指数的剩余安全使用期限预测	203
一、基于劣化指数线性变化的剩余安全使用期限预测 ...	203
二、基于劣化指数非线性变化的剩余安全使用期限 预测	203
第六节 港口起重机械结构的安全性评价与剩余安全 使用期限预测	205
一、计算模型与分析工况	205
二、分析结果及其与实测结果的比较	208
三、结构安全性的综合评价与预测	211
参考文献	215

第一章 绪 论

第一节 概 述

带有一定缺陷的结构在工程实际中是普遍存在的。它是指在制造、运输、使用等过程中由于不可避免的原因造成的一种距设计要求有偏差的情况,如材料的含硫量偏高,焊缝含杂质超标,有微观裂纹等。在各种结构缺陷中有一种较普遍存在的缺陷,就是由于制造、安装、使用等原因所产生的几何缺陷,如薄壁箱形结构各板的几何波浪度,或称为初始挠度。通过理论、实验及数值分析证明,过大的初始几何缺陷可以对结构的承载能力产生重大影响^[1~4]。薄壁箱形结构以及相应的局部初始几何缺陷大量存在于起重机械的臂架、人字架、转台及门架等构件中,它是工程结构分析的一个典型问题。本书所述的“缺陷结构”正是指这种具有局部初始几何缺陷的薄壁箱形结构。

起重机械是指那些经常存在短周期循环作业且承受很大载荷的机械。它通常具有频繁起升重物、带载运行的特点,因此其启动、制动次数多,对机械本身的冲击大。它广泛使用在港口、矿山、电站、建筑工地等。门座起重机是量大面广的重型机械产品之一。仅就交通部上海港口机械制造厂的情况来看,截止到 20 世纪 90 年代初已生产了 600 余台^[2],目前已超过 1000 台。按现在年产近 40 台的速度,以平均 400 万元一台来计算,每年仅门座起重机的产值就是 1 亿 6 千万元。全国的年产量及年产值会更多。与我国 20 世纪 80 年代中后期以来进口的德国、芬兰、阿根廷的门座起重机相比,我国自行设计生产的起重机无论在性能还是在设计、制造

质量上都有一定的差距。现在全国各港口普遍使用的装卸型门座起重机就有 1000 余台^[5],其中近三分之一的是 20 世纪 60 年代至 70 年代我国自行设计制造或从匈牙利进口的。这批起重机的金属结构已不同程度地出现损伤,但大部分仍在港口第一线繁忙地作业,对安全生产构成了威胁。造成上述情况的原因是多方面的,比如使用条件恶劣、维护不当等,但其设计方法上存在不足也是一个不可忽视的重要原因。表 1-1、表 1-2 所述的结构损伤形式及检测分析结果^[5]从某方面说明了这一点。

结构损伤的形式、原因与后果

表 1-1

形式	焊缝或母材开裂	表面波浪度过大或构件过大变形	锈蚀和磨损
主要原因	1. 结构联接处刚度突变、力流不畅或应力集中 2. 设计对疲劳、振动、冲击载荷的效应估计不足 3. 焊缝过于集中导致过大的焊热影响和残余应力 4. 材质质量差、焊接缺陷 5. 频繁超载	1. 薄壁结构加劲肋配置不当 2. 构件初始波浪度过大 3. 设备运输、安装和使用中的意外碰撞 4. 违章作业,严重超载	1. 构件进水或积水 2. 油漆养护不善,受腐蚀性物料和气体的腐蚀 3. 受钢丝绳等擦碰
导致后果	裂纹扩展直至构件断裂	改变内力分布、降低承载能力,直至局部屈曲和整体失稳	减小构件承载面积,直至构件断裂或屈曲

几台海港口座起重机的部分检测分析结果

表 1-2

型号/港内编号	GAN5—30	Q5—21	M10—25/26 #	M10—30/14 #
使用港口	广州港	广州港	连云港港	湛江港
制造国别	匈牙利	中国	中国	中国
使用年数	27	21	16	12

续上表

型号/港内编号		GAN5-30	Q5-21	M10-25/26 #	M10-30/14 #
静载 试验	最大静应力 σ_{jmax} (MPa)	-43	59.9	69	88
	测点部位 $\sigma_{jmax}/[\sigma]$ (%)	转柱上端 25.3	转柱上端 35.2	转台主 梁根部 40.6	转台主 梁根部 51.8
动载 试验	最大动应力 σ_{dmax} (MPa)	-68.8	98.3	121	-128
	测点部位 $\sigma_{dmax}/[\sigma]$ (%)	转柱下端 40.5	平衡梁后段 57.8	转台主 梁根部 71.2	平衡梁铰 轴后方 75.3
裂缝 检测	裂缝总长度 (mm)	12 000	595	1 995	3 370
	主要开裂部位 及有关情况	上支承 圆环与轨 道板之间 的贴角焊 缝,已做多 处搭接补 焊	门腿与 十字架的 联接过渡 段,平衡梁 配重箱根 部和减重 孔圆板	臂架吊 点处下盖 板、平衡梁 轴孔周围	象鼻架斜 拉杆上部结 点处,平衡 梁轴孔周围

在以往的结构设计中,大都采用了许用应力法。如果结构在最不利工况和最不利载荷组合下求出的最大计算应力小于许用应力的话,就认为结构件满足强度要求,在工作中不会破坏。然而许用应力法使用的载荷及材料性能等数据是一个确定值,没有考虑到数据的分散性和各种状态的随机性。同时也没考虑到设计对象在规定的条件下和规定的使用寿命期内完成预定功能的能力。比如,当许用应力定下来后,尽管计算应力比许用应力小,但这并不能保证设计对象 100% 不破坏。设计对象的可靠程度往往取决于设计者个人的经验,不具规范性。这种人为性与精确的结构计算

不相称。又比如臂架结构,它在变幅铰点附近的受力状态很复杂,一般都把许用应力取得较低(即安全系数较大),而在臂架其它受力明确、力流顺畅的地方则可以把许用应力取得高一些。但这同样不能说明变幅铰点处就比其它地方安全。所以常规的许用应力法不能确切地说明结构设计究竟是保守还是危险的问题,也不能用一个统一尺度回答机械结构在规定运行时间内完成预定功能的可能性的。事实上起重机金属结构不同程度地出现损伤和这一传统设计方法固有的不足是分不开的。因此,如何尽快提高起重机结构的设计质量并制定出关于起重机结构安全使用、维护的有科学依据的规程是目前起重机结构研究的一个热点问题,其中结构的可靠性研究是一个重要方向。所谓结构可靠性研究就是将载荷、材料强度、引起结构应力分布的各种状态及结构的实际尺寸都作为属于某种概率分布的统计量,应用概率论与数理统计及强度理论,导出在给定的设计条件下结构不产生破坏的概率的计算方法。根据这一方法可进行结构可靠度校核,或在给定可靠度下进行结构的尺寸设计。为此,要提高机械结构的设计质量,开展结构可靠性的研究是十分必要的。早在 20 世纪 80 年代末,桥式起重机可靠性设计方法的研究就被列为急需开展的科研课题之一^[6]。交通部制定的“九五”科技重点开发项目指南中,也明确提出了开展可靠性设计的研究。我国机械工业委员会在《关于加强机械产品可靠性工作的通知》中也指出:“在修订产品标准时,应将产品可靠性指标列入标准,并以此考核和鉴定产品。对那些重大的关键产品、量大面广的产品,将由机械工业部门定期公布可靠性指标的指令,要求在规定的时间内达到可靠性指标。对达不到可靠性指标的要停产整顿”。本书受交通部“九五”重点科技项目《港口起重机金属结构故障诊断及智能维修决策系统》的资助,对广泛存在于起重机械中的薄壁缺陷结构的承载特性及其可靠性与安全性进行了研究。根据较少量的实测结果,将起重量、起升速度、幅度、变幅速度、起制动时间、结构缺陷等考虑为随机变量,将测得的截面应力作为随机过程来处理,用人工神经网络来预测应力的实