

# 船舶结构力学手册

## СПРАВОЧНИК ПО СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ КОРАБЛЯ



О.М.帕利 Г.В.巴依佐夫 Е.Я.沃罗涅诺克 著  
徐秉汉 徐绚 徐铭麒 主译

国防工业出版社

National Defence Industry Press

<http://www.ndip.com.cn>

# 船舶结构力学手册

## СПРАВОЧНИК ПО СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ КОРАБЛЯ

О.М.帕利 Г.В.巴依佐夫 Е.Я.沃罗涅诺克 著  
徐秉汉 徐绚 徐铭麒 主译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记号:图字:军-2001-012号

图书在版编目(CIP)数据

船舶结构力学手册/(俄罗斯)帕利等编著;徐秉汉  
等译. —北京:国防工业出版社,2002.8

ISBN 7-118-02572-0

I. 船... II. ①帕... ②徐... III. 船舶—结构力学  
—手册 IV. U661.4-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 037972 号

国防工业出版社出版发行  
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)  
(邮政编码 100044)  
北京奥隆印刷厂印刷  
新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 70¼ 1755 千字  
2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月北京第 1 次印刷  
印数:1—1000 册 定价:198.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

# 序

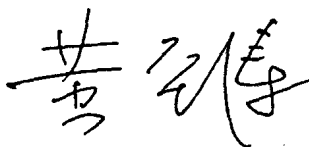
近年来,我国船舶工业有了长足的发展。2000年8月18日,我国首艘30万吨大型油轮(VLCC)正式开工建造,开创了我国建造超大型船舶的新纪元,标志着我国船舶工业有了进步和发展。

船舶工业的发展,向船舶科学技术提出了新的要求。由中国工程院院士徐秉汉率领我国一批船舶科技专家精心翻译的船舶科技新著《船舶结构力学手册》,即将交付出版。这是对船舶工业非常及时、非常有意义的贡献。

早在20世纪60年代和80年代,我国曾先后翻译出版过由前苏联学者斯曼斯基主编的《船舶结构力学手册》。但时隔多年,船舶结构理论与设计方法等均有了很大改观,特别是电子计算技术的迅猛发展及其在船舶科技领域的广泛应用,原译《手册》已不敷运用。即将出版的《船舶结构力学手册》系由俄罗斯克雷洛夫研究院舰艇结构研究部学术带头人帕利等于90年代所编著,且尚未正式出版。《手册》中包含了船舶结构理论和方法的最新发展,其中许多内容在我国目前的船舶结构设计领域中尚属薄弱和缺乏。《手册》较过去译本内容上更系统,理论上更严密,技术上更实用,不仅适用于传统的船舶和结构,而且还适用于新型船舶和非常规结构。《手册》的出版,也是近年来我国和俄罗斯在造船领域科研和生产进行交流和合作的成果之一。

期望《手册》的问世,将对我国船舶工业的发展起到积极的作用,将对我国从事船舶结构设计、研究和教育工作的广大读者有所裨益。

中国船舶重工集团公司 总经理



2002年1月18日

# 译者序

船舶结构力学是船舶结构设计、制造的理论依据。船舶结构力学涉及的内容极其丰富。国际上每每提及船舶结构力学这个名称,其含义系指“在船舶的设计、建造、使用和维修过程中,为确保船体结构的安全性,满足结构及安装其上的船用设备要求所涉及到的力学科学与技术”。就船舶结构力学的三个基本命题:环境与载荷、结构响应分析、危险状态与强度衡准而言,船舶结构力学应包括下述内容:

外部作用——环境与载荷;

结构响应分析——静力分析、稳定性分析和动力响应分析;

周期性交变载荷作用下船体材料和结构的承载能力——疲劳与断裂分析;

造船材料要求与船体金属耗量的优化分析;

工艺力学;

强度衡准与强度储备;

船体结构强度分析的一些特殊力学问题——船体进坞及下水强度、温度对船体结构的作用和船舶抗冰强度。

欲准确通晓涉及复杂数学理论计算方法的上述诸多力学学科知识并正确运用于船舶的设计、制造,对一般造船工程师而言,虽说不是不可能的,但亦是颇为困难的。倘若能将上述诸多内容高度概括,主要借助基本的力学理论、数学公式,甚或简洁的图表、曲线,汇编成一本便于造船工程师使用的手册,无疑是具有重要实用价值的。

正是基于上述考虑,早在 1934 年前苏联就出版了有关船舶结构设计计算方法的《造船手册》。在此基础上,于 20 世纪五六十年代,前苏联科学院院士 Ю.А. 斯曼斯基(Щиманский)主编了三卷本的《船舶结构力学手册》。上述三卷本的《船舶结构力学手册》的中译本分别于 1964 年、1966 年和 1980 年由上海科学技术出版社出版。

科学技术的飞速发展,特别是电子计算技术的迅猛发展及其在船舶科技领域的广泛应用,极大地改观了传统的船舶结构设计分析理念,涌现出许多新的船舶结构设计分析方法;近年来,在船舶结构力学方面业已积累了大量的现代造船实践中所应用的新资料。因此,前苏联五六十年代出版的《船舶结构力学手册》已显陈旧,不敷运用。基于此,重新编写一本汇集现今船舶结构力学理论与实用设计计算方法新成就的《船舶结构力学手册》已是势在必行了。

现今,俄罗斯克雷洛夫研究院舰艇结构研究部的主要学术带头人 О.М. 帕利(Палий)、Г.В. 巴依佐夫(Бойцов)、Е.Я. 沃罗涅诺克(Вороненок),基于他们长期从事前苏联的航空母舰、驱逐舰、掠海地效应船、大型民船等的结构设计、研究与试验工作,以及编制前苏联各类军用舰艇及大型民用海船的结构设计计算规则之经验,在总结他们多年来从事舰船结构设计、研究、试验的理论与实践的基础上,编写出新版《船舶结构力学手册》。

新版《船舶结构力学手册》共分三卷。

第一卷论述了应用于船舶结构力学的基本概念、原理和方法。主要内容包括:梁和杆的静力

计算,杆系的静力计算,板的计算以及弹性力学的若干问题。

第二卷主要讨论非弹性系统的计算、结构稳定性和结构动力学。主要内容包括:塑性与蠕变理论的基本方程式,梁和板架的极限平衡,梁和板架的弹塑性弯曲,结构的稳定性理论,杆、薄板以及板架的稳定性计算方法,结构振动理论,具有有限个自由度的线性系统的振动计算,杆的横向振动,杆的纵向振动,杆的扭转振动,杆的弯曲—扭转振动的计算,刚架的振动,平板的振动,振动的特殊形式,以及流体中杆的振动等问题。

第三卷就船体结构的三个基本命题:环境与载荷、结构响应分析、危险状态与强度衡准作了详尽论述,涉及的内容有:计算载荷——静力载荷和局部载荷,海洋环境与现代波浪载荷理论,船体结构强度和承载能力,造船材料及其要求,周期性交变载荷条件下材料和结构的承载能力,结构节点,强度衡准和强度贮备,优化和船体金属耗量,船舶进坞及下水强度,船舶结构计算的非传统问题,温度对结构的作用,船舶抗冰强度,船体总振动,局部振动及其衡准,船舶居住和服务舱室振动的防治。

不言而喻,由上述手册中的主要内容显然可见,现今翻译出版的《船舶结构力学手册》较之由Ю.А.斯曼斯基在五六十年来主编的《船舶结构力学手册》作了极大的修改和扩充。新版《船舶结构力学手册》删除了原手册中纯属于参考性质的“数学部分”内容,删除了一些结构力学中已陈旧的、现今已不再应用的方法,还删除了一些理论部分以及专用特性的内容。新版《船舶结构力学手册》增添了近年来在该领域内获得的大量最新研究成果。例如:海洋环境与外部作用载荷,船体材料选取的原则与分析,制造工艺对船体强度的影响,周期性交变载荷作用下金属材料的疲劳和结构节点的疲劳强度分析,船体强度衡准和优化设计分析,船底砰击和船首外飘砰击载荷的实用计算方法,超大型油轮和大型无舱壁船的总强度计算分析,特种船舶的防护和碰撞设计,水翼艇的水翼振动计算等。上述诸多内容乃是俄罗斯船舶结构力学工作者长期从事舰船设计、研究的成果,其中许多内容是目前我国舰船结构设计领域的薄弱环节或空白点。因此,新版《船舶结构力学手册》对我国造船工程师具有重要应用价值和参考价值。

新版《船舶结构力学手册》在理论上更加严谨。在船体结构设计外载荷的选取中,原手册乃是基于经验的、取波高等于船长的  $1/20$ 。新版《船舶结构力学手册》乃是基于近代随机海浪理论及实船统计资料得出的超越概率为  $10^{-8}$  和  $10^{-5}$  的计算波高,分别取作极限工况和巡航营运工况时的总强度校核。这样得出的计算波高,无疑在理论上更加合理。

新版《船舶结构力学手册》,为便于造船工程师具体应用,详细地给出了计算公式和数据图表。特别须指出的是,有些公式中的系数或参数的取值均给出具体量值,而这些具体量值有时单纯从理论上很难求出。它们乃是基于长期的造船实践和营运经验,或基于大量的数值计算而导出。这些系数或参数的具体量值,对造船工程师而言弥足珍贵,具有重要应用价值。

对于较为复杂的结构问题,在新版《船舶结构力学手册》中提供了各种结构的有限元计算模型和相应的求解步骤,使用者可十分简便地据此编制出相应的计算程序,借助计算机进行求解。

新版《船舶结构力学手册》编写的一个显著特点是,作者在阐述问题时,并非只是简单地给出具体的计算方法,而是对所涉及的基本理论、方程式的推导亦作了概括性的论述。这对于那些要使用本手册的造船工程师,甚或对于那些并非十分熟悉船舶结构力学的技术人员,可无需再去查阅其他参考资料,就可对所要解决的船舶结构力学问题有一个清晰深刻的理解,对其准确使用本手册,乃至据此研究新的计算方法,都是极其有益的。

综上所述,新译本的《船舶结构力学手册》内容丰富,资料完备,理论严谨,编排紧凑,查用方便,并列举很多计算实例。可以预期,本手册不仅对在实际业务中要遇到船体强度计算的造船工

NIAB 19/03

程师是有益的,而且对于船舶与海洋工程专业的大学生、研究生、教师及科研工作者都能有效地加以应用,并可作为他们的常用工具书。

还须指出的是前苏联在 1982 年亦曾出版过《船舶结构力学手册》,但 1982 年版本在国内未有中译本。现今翻译出版的《船舶结构力学手册》中译本系依据俄罗斯克雷洛夫研究院 1997 年提供的俄文打印稿《СПРАВОЧНИК ПО СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ КОРАБЛЯ》翻译出版的,俄文原稿在俄罗斯尚未正式出版,在我国该手册系首次出版发行。

本手册第一卷中的第一章到第四章由徐秉汉译,徐绚、庄和坝校;第五章到第十章由李传唐译,徐绚校;第十一章到第十五章由徐绚译,李传唐校。第二卷中的第一章到第三章由徐绚、赵玉华译,徐秉汉校;第四章由甘锡林译,徐铭麒校;第五章到第七章由甘锡林译,周殿邦校;第八章到第十二章由金福民译,叶元培、吴士冲校;第十三章到第十六章由叶元培译,吴士冲校;第十七章由胡敬译,吴士冲校。第三卷中的第一章和第二章由孙永年译,徐铭麒校;第三章由徐铭麒译,王高钦校;第四章到第七章由邵文蛟译,徐铭麒校;第八章到第十章由王高钦译,徐铭麒校;第十一章和第十二章由陶鉴凡、张镜良译,徐铭麒校;第十三章到第十六章由徐铭麒译,王高钦校;第十七章到第十九章由许立人译,徐铭麒校。裴俊厚、庄和坝从文字和技术上对全书进行了统稿工作。

新版《船舶结构力学手册》中译本的出版,得到中国人民解放军总装备部专项资金资助,国防工业出版社许西安、胡万忱两位同志,对书稿的编辑加工作了大量工作,谨在此深表谢意。

虽然本手册的译校者已经时时注意尽量避免出错,但由于水平所限,脱稿时间也较紧迫,译稿中出现错误和不妥之处在所难免,恳请同行专家和读者批评指正。

## 编 著 者 按 语

本次出版的《船舶结构力学手册》仅在个别部分重复了 1982 年出版的版本。1982 年版本中的主要内容在本手册的第一、第二卷中用简缩形式加以论述。在将 1982 年版本中的材料移入到本手册的改变过程中删去了一些结构力学中业已陈旧的、在现今实践中不再应用的方法；删去了一些理论部分以及专用特性的内容；删去了用计算机来实施计算的一般方法的那部分内容，因为这些方法的发展很快，当《手册》出版时可能在很大程度上又陈旧了。

在本次版本中增加了在船舶设计中要应用的原理与论述，这些内容过去没有。这部分内容在三卷中都涉及到。

作者期望所提出的补充内容及改变和重写的内容，将使《手册》吸引更广泛的读者——从学生和初级工程师直到高水平的设计计算师和科学工作者。

第一卷论述了应用于船舶结构力学的基本概念、原理和方法。主要内容包括：梁和杆的静力计算，杆系的静力计算，板的计算以及弹性力学的若干问题。

第一卷的第一章到第三章、第五章到第七章、第十二章到第十五章由 O.M. 帕利撰写；第四章和第九章中的第 1、2 节及第八章中的第 6 节由 Г.Б. 巴依佐夫撰写；第十章、第十一章由 Е.Я. 沃罗涅诺克撰写；第八章由 С.В. 索钦斯基撰写；第九章中的第 3 节由 М.Г. 科瓦里撰写。

第二卷包含了非弹性系统的计算、结构稳定性和结构动力学的知识，有部分内容重复了第一版手册中相应章节的内容。作者在取材上力图最大限度地满足造船界设计、计算工作者和其他领域中的技术人员的实际需求。同时，作者也力求它能对不直接与计算有关的工程师、大学生、研究生有所帮助。

第二卷的第一章中的第 4 节到第 7 节由 O.M. 帕利撰写；第八章、第九章由 Е.Я. 沃罗涅诺克和 В.И. 秋维柯夫斯基撰写；第二章、第三章由 Е.М. 阿巴朗诺威姆撰写；第十章到第十五章、第十七章由 В.И. 帕良阔夫撰写；第三章中的第 4 节由 Н.Ю. 沙夫洛夫撰写；第二章中的第 1 节由 В.А. 库尔久莫夫撰写。

第三卷包含船体结构强度校核和保障的实用方法有关内容。阐述了全部涉及强度的三个问题——外载荷，结构对这些外载荷的响应，危险状态的衡准及强度储备。对诸如现实结构及其营运条件的理想化、外部作用向力的转换、材料质量及工艺在保障实际强度中的作用以及其他一系列有重要实际意义的方面都给予了特别的注意。

作者在阐述问题时，力求不简单地给出具体的计算方法，而是展示建立这些方法的步骤，把注意力放在将现实对象转换为理想化模型的一般方法上，而此后再转向实际的计算方法。作者认为，这样做不仅会使这里所引用的资料对造船者有用，而且还会使相关领域的专家们感兴趣。

第三卷的第一章到第三章、第五章、第六章中的第 1 节和第 2 节、第七章中的第 1 节到第 6 节、第九章到第十二章及第十五章由 Г.Б. 巴依佐夫撰写；第八章由 O.M. 帕利撰写；第十七章由



Е.Я. 沃罗涅诺克和Э.И. 依凡纽塔合作撰写;第十九章由В.И. 波列亚科夫撰写;第十八章由Э.И. 依凡纽塔和В.И. 波列亚科夫(第4节)合作撰写;第四章由О.М 帕利、О.Е. 里托诺夫(第1节)和М.Г. 科瓦里(第2节到第4节)撰写;第十三章由С.В. 索钦斯基撰写;第十四章由А.Б. 涅斯济洛夫(第2节到第4节)和А.И. 勃朗斯基(第3节)合作撰写;第十六章由В.А. 库尔久莫夫(第1节和第2节)和Е.М. 阿波罗诺夫(第3节到第5节)撰写;Е.М. 阿波罗诺夫还撰写了第六章中的第5节,并与Г.В. 巴依佐夫合作撰写了第七章的第7节;А.Н. 谢尔丘钦柯亦参加了第二章中的第1节的准备工作。

|      |     |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|
| 主 译  | 徐秉汉 | 徐 绚 | 徐铭麒 |     |
| 翻 译  | 徐秉汉 | 徐 绚 | 徐铭麒 | 李传唐 |
|      | 叶元培 | 甘锡林 | 邵文蛟 | 王高钦 |
|      | 许立人 | 金福民 | 孙永年 | 赵玉华 |
|      | 张镜良 | 陶鉴凡 | 胡 敬 |     |
| 校 对  | 徐秉汉 | 徐 绚 | 徐铭麒 | 李传唐 |
|      | 吴士冲 | 叶元培 | 王高钦 | 周殿邦 |
|      | 庄和坝 |     |     |     |
| 专业编辑 | 裴俊厚 | 庄和坝 |     |     |
| 责任编辑 | 许西安 |     |     |     |

## 内 容 简 介

新版《船舶结构力学手册》共分三卷。

第一卷论述了应用于船舶结构力学的基本概念、原理和方法。主要包括:梁和杆的静力计算,杆系的静力计算,板的计算以及弹性力学的若干问题。

第二卷主要讨论非弹性系统的计算、结构稳定性和结构动力学。主要包括:塑性与蠕变理论的基本方程式,梁和板架的极限平衡,梁和板架的弹塑性弯曲,结构的稳定性理论,杆、薄板以及板架的稳定性计算方法,结构振动理论,具有有限个自由度的线性系统的振动计算,杆的横向振动,杆的纵向振动,杆的扭转振动,杆的弯曲—扭转振动的计算,刚架的振动,平板的振动,振动的特殊形式,以及流体中杆的振动等问题。

第三卷就环境与载荷、结构响应分析、船舶危险状态与强度衡准作了详尽论述,涉及的内容有:计算载荷—静力载荷和局部载荷,海洋环境与现代波浪载荷理论,船体结构强度和承载能力,造船材料及其要求,周期性交变载荷条件下材料和结构的承载能力,结构节点,强度衡准和强度储备,优化和船体金属耗量,船舶进坞及下水强度,船舶结构计算的非传统问题,温度对结构的作用,船舶抗冰强度,船体总振动,局部振动及其衡准,船舶居住和服务舱室振动的防治。

新版《船舶结构力学手册》不仅可作为造船工程师的实用工具书,亦可供船舶与海洋工程专业的大学生、研究生、教师及科研工作者参考。

# 目 录

## 第一卷 总论·杆、杆系和板架·板

### 第一篇 结构力学的理论、方法、基本概念的简述

|                                            |    |                                        |    |
|--------------------------------------------|----|----------------------------------------|----|
| 第一章 应用于结构力学中的基本概念、<br>原理和方法 .....          | 3  | 1.5 应力与应变的关系 .....                     | 18 |
| 1.1 结构力学中的基本概念及原理 .....                    | 3  | 1.5.1 流变关系 .....                       | 18 |
| 1.1.1 结构力学中研究的对象(物体)<br>·物体变形特性的理想化 .....  | 3  | 1.5.2 弹性体·一般特性 .....                   | 18 |
| 1.1.2 变形体中的外力和内力 .....                     | 4  | 1.5.3 线弹性均匀体·虎克定律 .....                | 19 |
| 1.1.3 反力·静定与静不定 .....                      | 5  | 1.5.4 具有3个正交的弹性对称平面<br>的各向异性线弹性体 ..... | 20 |
| 1.1.4 相当力系的替代·圣维南(Сен-Венан)<br>原理 .....   | 6  | 1.5.5 流变关系的有限形式 .....                  | 21 |
| 1.2 位移及应变 .....                            | 8  | 1.6 弹性体的势能 .....                       | 22 |
| 1.2.1 位移·物体的自然状态 .....                     | 8  | 1.6.1 连续介质中的内力功 .....                  | 22 |
| 1.2.2 相对伸长和剪切 .....                        | 8  | 1.6.2 弹性体的势能·应变余能 .....                | 22 |
| 1.2.3 相对伸长与转角的线性关系 .....                   | 10 | 1.6.3 线弹性体 .....                       | 23 |
| 1.2.4 坐标轴变化时应变的变换 .....                    | 10 | 1.6.4 线弹性物体的能量关系式及其<br>原理 .....        | 23 |
| 1.2.5 应变张量·主应变 .....                       | 11 | 1.7 结构力学基本方程式的建立<br>原则·一般观点及方法 .....   | 24 |
| 1.2.6 体积及形状的应变·八面<br>体应变·应变强度 .....        | 12 | 1.7.1 基本方程的组成 .....                    | 24 |
| 1.3 应力 .....                               | 13 | 1.7.2 平衡方程 .....                       | 25 |
| 1.3.1 定义 .....                             | 13 | 1.7.3 不同组方程的相容性 .....                  | 29 |
| 1.3.2 坐标系变化时应力分量的变换 .....                  | 13 | 1.7.4 原始方程的简化·运动和力<br>的假设 .....        | 30 |
| 1.3.3 应力张量·最大剪应力·主应力 .....                 | 14 | 1.7.5 结构力学中的离散模型 .....                 | 31 |
| 1.3.4 应力不变量的物理意义·平均压<br>力·应力强度·八面体应力 ..... | 15 | 1.7.6 求解静不定结构的原则 .....                 | 34 |
| 1.3.5 点应力状态的图形表示 .....                     | 15 | 第二章 求解结构力学问题的变分<br>方法 .....            | 38 |
| 1.4 连续方程 .....                             | 16 | 2.1 前言·主要的变分原理·自由度<br>不多的体系的能量原理 ..... | 38 |
| 1.4.1 一般概念 .....                           | 16 | 2.1.1 前言 .....                         | 38 |
| 1.4.2 连续方程的微分形式 .....                      | 16 | 2.1.2 虚位移原理 .....                      | 38 |
| 1.4.3 按已知的应变分量确定位移 .....                   | 17 |                                        |    |

|                                         |    |                                                        |     |
|-----------------------------------------|----|--------------------------------------------------------|-----|
| 2.1.3 虚应力原理·最小功原理 .....                 | 39 | 2.2.3 示例 .....                                         | 44  |
| 2.1.4 自由度不多的体系的拉格朗日原理、<br>卡斯奇梁诺原理 ..... | 40 | 2.3 布勃诺夫-迦辽金 (Бубнов-Галеркин)<br>法·广义的布勃诺夫-迦辽金法 ..... | 45  |
| 2.1.5 能量原理的应用示例 .....                   | 40 | 2.3.1 布勃诺夫-迦辽金法的求解过程 .....                             | 45  |
| 2.1.6 混合变分原理 .....                      | 43 | 2.3.2 方法应用的示例 .....                                    | 46  |
| 2.2 里兹 (Ритц) 法 .....                   | 43 | 2.3.3 广义的布勃诺夫-迦辽金法 .....                               | 47  |
| 2.2.1 基本原理 .....                        | 43 | 2.3.4 应用混合法的示例 .....                                   | 48  |
| 2.2.2 对基函数的要求·里兹法的<br>求解过程 .....        | 43 | 2.3.5 线弹性问题的布勃诺夫-迦辽金法 .....                            | 48  |
|                                         |    | 2.4 特列弗次 (Треффи) 法 .....                              | 49  |
| <b>第二篇 梁和杆的静力计算</b>                     |    |                                                        |     |
| <b>第三章 基本概念及应变的形式</b> .....             | 50 | 4.3.1 两端自由支持梁 .....                                    | 77  |
| 3.1 原始假定 .....                          | 50 | 4.3.2 一端固定的梁 .....                                     | 84  |
| 3.1.1 基本概念和定义 .....                     | 50 | 4.3.3 两端固定的梁 .....                                     | 87  |
| 3.1.2 坐标系及符号规则 .....                    | 51 | 4.3.4 一端固定一端自由支持的梁 .....                               | 94  |
| 3.1.3 外载荷 .....                         | 52 | <b>第五章 梁的复杂弯曲</b> .....                                | 101 |
| 3.1.4 杆变形的主要类型 .....                    | 53 | 5.1 概念和定义 .....                                        | 101 |
| 3.1.5 杆 (梁) 横剖面的几何特征 .....              | 54 | 5.1.1 定义 .....                                         | 101 |
| 3.2 简单变形类 .....                         | 55 | 5.1.2 假定 .....                                         | 102 |
| 3.2.1 拉—压 .....                         | 55 | 5.1.3 平衡方程 .....                                       | 103 |
| 3.2.2 扭转 .....                          | 56 | 5.1.4 变形位能·外力功 .....                                   | 104 |
| 3.2.3 剪切 .....                          | 56 | 5.2 小挠度有限刚度梁的方程·在给<br>定轴向力作用下的单跨梁 .....                | 105 |
| 3.2.4 弯曲 .....                          | 57 | 5.2.1 复杂弯曲方程 .....                                     | 105 |
| 3.3 梁的组合变形 .....                        | 58 | 5.2.2 横向载荷叠加原理·引起非平面<br>弯曲的横向载荷 .....                  | 106 |
| 3.3.1 弯曲与剪切 .....                       | 58 | 5.2.3 在沿长度为常量的轴向力作用下等<br>剖面梁的一般解 .....                 | 106 |
| 3.3.2 弯曲与扭转 .....                       | 61 | 5.2.4 间断载荷·柯西—克雷卜什形<br>式的解 .....                       | 108 |
| 3.3.3 弯曲与拉压 .....                       | 61 | 5.2.5 算例·轴向力对弯曲影响的<br>定性描述 .....                       | 109 |
| <b>第四章 梁的横向弯曲</b> .....                 | 62 | 5.2.6 初挠度的影响 .....                                     | 110 |
| 4.1 弯曲和剪切引起的挠度 .....                    | 62 | 5.2.7 剪切计算 .....                                       | 113 |
| 4.1.1 静定梁和静不定梁 .....                    | 62 | 5.2.8 变剖面梁·沿长度变化的轴向力 .....                             | 114 |
| 4.1.2 等直梁的一般积分方程及其<br>在静定梁计算中的应用 .....  | 62 | 5.3 单跨梁的弯曲要素表·在已知轴向<br>力的作用下连续梁的计算 .....               | 116 |
| 4.1.3 初参数法 .....                        | 64 | 5.3.1 弯曲要素表 .....                                      | 116 |
| 4.1.4 叠加原理 .....                        | 65 | 5.3.2 应用弯曲要素表对其他端部固定<br>条件梁的计算 .....                   | 117 |
| 4.1.5 剪切引起的位移 .....                     | 66 | 5.3.3 两端具有对称边界条件梁的计算 .....                             | 117 |
| 4.2 静不定梁的求解 .....                       | 67 | 5.3.4 铰接在独立弹性支座上的连续梁 .....                             | 129 |
| 4.2.1 总则 .....                          | 67 |                                                        |     |
| 4.2.2 支座力偶系数 .....                      | 69 |                                                        |     |
| 4.2.3 三弯矩方程及其解 .....                    | 71 |                                                        |     |
| 4.2.4 五弯矩方程 .....                       | 74 |                                                        |     |
| 4.2.5 变剖面梁的计算 .....                     | 74 |                                                        |     |
| 4.3 梁的弯曲要素表 .....                       | 76 |                                                        |     |

|                                       |     |                                             |     |
|---------------------------------------|-----|---------------------------------------------|-----|
| 5.4 受静不定轴向力作用的柔性梁和绝对柔性梁 .....         | 131 | 6.5.1 剪切的影响 .....                           | 155 |
| 5.4.1 弯曲方程·一般计算方法 .....               | 131 | 6.5.2 轴向力的影响 .....                          | 156 |
| 5.4.2 柔性梁与支撑协调变形的特性 .....             | 132 | 6.5.3 单向弹性基础梁的计算 .....                      | 157 |
| 5.4.3 沿长度受均布横向载荷作用的单跨等剖面梁 .....       | 133 | 6.6 具有跨间弹性支座的变刚度弹性基础上的变剖面梁的复杂弯曲数值计算方法 ..... | 157 |
| 5.4.4 单跨梁的近似计算 .....                  | 134 | 第七章 曲杆的平面变形 .....                           | 161 |
| 5.4.5 绝对柔性梁(柔索)的计算 .....              | 135 | 7.1 基本概念和定义·基本方程 .....                      | 161 |
| 第六章 弹性基础梁的弯曲 .....                    | 137 | 7.1.1 定义·假定 .....                           | 161 |
| 6.1 概念和定义·基本方程 .....                  | 137 | 7.1.2 平衡方程·几何关系·变形位能 .....                  | 162 |
| 6.1.1 定义和假定 .....                     | 137 | 7.1.3 边界条件 .....                            | 163 |
| 6.1.2 平衡方程·几何关系·弹性关系 .....            | 137 | 7.2 等剖面圆形杆 .....                            | 163 |
| 6.1.3 变形位能 .....                      | 138 | 7.2.1 基本方程·一般解 .....                        | 163 |
| 6.2 基础刚度沿长度不变的等剖面梁 .....              | 138 | 7.2.2 沿周长受均布载荷 $q$ 作用的杆 .....               | 164 |
| 6.2.1 一般解的不同形式 .....                  | 138 | 7.2.3 闭合环的变形 .....                          | 165 |
| 6.2.2 初参数形式的解(考虑集中载荷和外力矩) .....       | 140 | 7.2.4 圆弧形杆受载的特殊情况 .....                     | 168 |
| 6.2.3 无中间支座的无限长梁 .....                | 141 | 7.3 任意形状的平面曲杆 .....                         | 170 |
| 6.2.4 有限长梁·一般计算方法 .....               | 143 | 7.3.1 静定杆的内力 .....                          | 170 |
| 6.2.5 弹性基础对梁弯曲的影响 .....               | 143 | 7.3.2 杆的位移 .....                            | 171 |
| 6.3 单跨等剖面梁的弯曲要素表·在跨度上具有中间支座梁的计算 ..... | 145 | 7.3.3 静不定杆 .....                            | 173 |
| 6.3.1 弯曲要素表 .....                     | 145 | 7.4 有限刚度杆 .....                             | 174 |
| 6.3.2 具有跨间支座的梁 .....                  | 152 | 7.4.1 定义·假定 .....                           | 174 |
| 6.4 近似计算方法·变刚度的弹性基础上的变剖面梁 .....       | 152 | 7.4.2 平衡方程·几何关系·边界条件 .....                  | 175 |
| 6.4.1 等剖面梁·傅里叶级数展开 .....              | 152 | 7.4.3 方程组的解 .....                           | 175 |
| 6.4.2 里兹法 .....                       | 153 | 7.4.4 等剖面圆形杆 .....                          | 176 |
| 6.4.3 逐步近似法 .....                     | 154 | 7.4.5 杆的有限刚度的影响 .....                       | 177 |
| 6.4.4 关于弯矩和剪力的计算 .....                | 155 | 第八章 组合杆 .....                               | 179 |
| 6.5 剪切和轴向力对弯曲的影响·单面弹性基础梁 .....        | 155 | 8.1 基本概念和关系式 .....                          | 179 |
|                                       |     | 8.1.1 基本概念 .....                            | 179 |
|                                       |     | 8.1.2 确定杆束中杆变形的关系式 .....                    | 181 |
|                                       |     | 8.2 平面杆系(束) .....                           | 184 |
|                                       |     | 8.3 空间杆束 .....                              | 191 |

### 第三篇 杆系的静力计算

|                             |     |                         |     |
|-----------------------------|-----|-------------------------|-----|
| 第九章 平板架的静力计算 .....          | 195 | 板架 .....                | 200 |
| 9.1 板架类型·板架分类·板架的作用载荷 ..... | 195 | 9.3 相交梁的挠度等同法 .....     | 204 |
| 9.2 静力计算时板架的图解说明 .....      | 196 | 9.3.1 挠度等同法的基本关系式 ..... | 204 |
| 9.2.1 梁的图解说明 .....          | 196 | 9.3.2 由两根相交梁组成的体系 ..... | 207 |
| 9.2.2 简化为结构正交各向异性板的         |     | 9.3.3 由3根相交梁组成的体系 ..... | 207 |
|                             |     | 9.3.4 由4根相交梁组成的体系 ..... | 209 |

|                                                   |     |                                 |     |
|---------------------------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| 9.3.5 具有 3 根同样的主向梁和一根交叉梁的板架 .....                 | 209 | 10.1.1 概念和定义 .....              | 229 |
| 9.3.6 具有 4 根同样的主向梁和一根交叉梁的板架 .....                 | 210 | 10.1.2 静定桁架的基本特性 .....          | 230 |
| <b>9.4 具有很多同样的主向梁和一根交叉梁的板架计算</b> .....            | 211 | 10.1.3 支座反力的确定 .....            | 231 |
| 9.4.1 如同弹性基础梁一样的板架计算 ..                           | 211 | 10.1.4 平衡方程的建立方法 .....          | 231 |
| 9.4.2 外载荷均匀分布在板架上 .....                           | 212 | 10.1.5 确定桁架变形和节点位移的方法 .....     | 234 |
| 9.4.3 外载荷按静水压力规律分布在主向梁上 .....                     | 215 | <b>10.2 平面静不定桁架</b> .....       | 235 |
| 9.4.4 外载荷按静水压力规律分布在交叉梁上 .....                     | 215 | 10.2.1 概念和定义 .....              | 235 |
| 9.4.5 外载荷为作用在交叉梁跨度中点的集中力 $P$ .....                | 216 | 10.2.2 静不定桁架中力的确定方法 .....       | 235 |
| 9.4.6 在交叉梁上距支座三分之一跨度处作用着两个相等的集中力 $P$ 形式的外载荷 ..... | 217 | 10.2.3 计算静不定桁架中的装配应力和温度应力 ..... | 237 |
| <b>9.5 具有很多根同样的交叉梁和很多根同样的主向梁的板架计算</b> .....       | 218 | <b>10.3 空间桁架</b> .....          | 237 |
| <b>9.6 能量法</b> .....                              | 223 | 10.3.1 概念和定义 .....              | 237 |
| 9.6.1 里兹法 .....                                   | 223 | 10.3.2 空间桁架的计算方法 .....          | 237 |
| 9.6.2 弹性系统的等效变换法 .....                            | 224 | <b>第十一章 平面刚架</b> .....          | 239 |
| 9.6.3 建立在板架转化为弹性基础梁概念上的计算式 .....                  | 226 | <b>11.1 任意几何形状的刚架</b> .....     | 239 |
| <b>第十章 直杆组成的桁架</b> .....                          | 229 | 11.1.1 概念·定义和基本假定 .....         | 239 |
| <b>10.1 平面静定桁架</b> .....                          | 229 | 11.1.2 典型计算方法·力法的方程 .....       | 239 |
|                                                   |     | 11.1.3 位移法的典型方程 .....           | 242 |
|                                                   |     | <b>11.2 直杆刚架的计算</b> .....       | 243 |
|                                                   |     | 11.2.1 简单刚架 .....               | 243 |
|                                                   |     | 11.2.2 复杂刚架·角变形法 .....          | 244 |
|                                                   |     | 11.2.3 节点逐步平衡法 .....            | 248 |
|                                                   |     | <b>11.3 空间刚架和平面空间刚架</b> .....   | 254 |
|                                                   |     | 11.3.1 空间和平面空间刚架的特性 .....       | 254 |
|                                                   |     | 11.3.2 杆系数值计算方法的基本原理 .....      | 255 |

## 第四篇 板的计算·弹性力学的若干问题

|                                   |     |                                    |     |
|-----------------------------------|-----|------------------------------------|-----|
| <b>第十二章 板变形的概述·板的平面变形</b> ..      | 257 | <b>12.3 受平面载荷作用的圆形板和圆环形板</b> ..... | 267 |
| <b>12.1 基本概念·变形的类型·板的分类</b> ..    | 257 | 12.3.1 概述 .....                    | 267 |
| 12.1.1 基本概念 .....                 | 257 | 12.3.2 板的特殊承载情况 .....              | 270 |
| 12.1.2 板应力—变形状态的类型 .....          | 257 | <b>第十三章 刚性板的弯曲</b> .....           | 275 |
| 12.1.3 板按弯曲应力与悬链应力相互影响程度的分类 ..... | 258 | <b>13.1 基本概念和方程</b> .....          | 275 |
| <b>12.2 在平面内受载的矩形板</b> .....      | 258 | 13.1.1 基本假定 .....                  | 275 |
| 12.2.1 概述 .....                   | 258 | 13.1.2 板的位移和变形 .....               | 275 |
| 12.2.2 多项式解 .....                 | 258 | 13.1.3 板的应力·力和力矩 .....             | 276 |
| 12.2.3 三角级数解 .....                | 262 | 13.1.4 平衡方程 .....                  | 278 |
| 12.2.4 受不同形式载荷作用的板的特解 .....       | 263 | 13.1.5 边界条件 .....                  | 278 |
| 12.2.5 板的近似计算方法 .....             | 265 | 13.1.6 板的弯曲位能·作用在板上的外力功 .....      | 279 |

|                                                                |     |                                                             |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------|-----|
| 13.1.7 柱坐标系中的方程 .....                                          | 280 | 14.3 大挠度有限刚性板 .....                                         | 320 |
| 13.1.8 考虑材料的各向异性 .....                                         | 281 | 14.3.1 方程·弯曲特性 .....                                        | 320 |
| 13.1.9 考虑板的横向剪切 .....                                          | 282 | 14.3.2 解法 .....                                             | 320 |
| <b>13.2 某些板的解</b> .....                                        | 284 | 14.3.3 承受拉伸的矩形板的筒形弯曲 .....                                  | 321 |
| 13.2.1 纳维(Навье)解 .....                                        | 284 | 14.3.4 具有初挠度的拉伸板的筒形<br>弯曲 .....                             | 323 |
| 13.2.2 列维(Леви)解 .....                                         | 284 | 14.3.5 承受均匀压力 $q$ 作用的具有有限<br>边长比 $\lambda = a/b$ 的矩形板 ..... | 324 |
| 13.2.3 克雷卜什(Клебш)解 .....                                      | 285 | 14.3.6 承受均匀压力 $q$ 的圆板(周界半<br>径 $a$ ) .....                  | 330 |
| <b>13.3 矩形薄板弯曲计算表</b> .....                                    | 286 | <b>14.4 绝对柔性板—薄膜</b> .....                                  | 332 |
| 13.3.1 列表说明 .....                                              | 286 | 14.4.1 方程 .....                                             | 332 |
| 13.3.2 承受沿整个表面均布的强度为<br>$P$ 的载荷作用各向同性板 .....                   | 287 | 14.4.2 按柱面挠曲的板—薄膜 .....                                     | 332 |
| 13.3.3 承受由一个边上为零按静水压力<br>规律变化到对边上最大强度为 $p$<br>的载荷作用各向同性板 ..... | 292 | 14.4.3 承受均匀压力 $q$ 的半径为 $a$ 的<br>圆板—薄膜 .....                 | 333 |
| 13.3.4 承受其他形式载荷作用各向<br>同性板 .....                               | 297 | <b>第十五章 若干弹性理论问题的解</b> .....                                | 334 |
| <b>13.4 圆形板和圆环形板的对称<br/>弯曲</b> .....                           | 299 | <b>15.1 多连体型杆的纯扭转</b> .....                                 | 334 |
| 13.4.1 沿周界自由支持、半径为 $b$ 的<br>圆形板 .....                          | 299 | 15.1.1 基本概念和方程 .....                                        | 334 |
| 13.4.2 周界刚性固定、半径为 $b$ 的圆<br>形板 .....                           | 301 | 15.1.2 单连体杆 .....                                           | 335 |
| 13.4.3 外周界 $r = b$ 自由支持、内周界<br>$r = a$ 完全自由的圆环形板 .....         | 302 | 15.1.3 多连体杆 .....                                           | 337 |
| 13.4.4 内周界 $r = a$ 自由支持、外周界<br>$r = b$ 完全自由的圆环形板 .....         | 303 | 15.1.4 多连体薄壁杆的计算特点 .....                                    | 338 |
| <b>第十四章 有限刚性板和柔性板的弯曲</b> ..                                    | 305 | 15.1.5 薄壁杆件的算例 .....                                        | 338 |
| <b>14.1 基本概念</b> .....                                         | 305 | 15.1.6 薄壁杆的位移 .....                                         | 339 |
| 14.1.1 概念·假定 .....                                             | 305 | 15.1.7 剖面的扇形特性 .....                                        | 340 |
| 14.1.2 位移和变形 .....                                             | 306 | 15.1.8 单连体薄壁杆的翘曲 .....                                      | 342 |
| 14.1.3 应力、力和力矩 .....                                           | 306 | <b>15.2 杆的约束扭转</b> .....                                    | 342 |
| 14.1.4 平衡方程 .....                                              | 306 | 15.2.1 基本概念和定义 .....                                        | 342 |
| 14.1.5 边界条件 .....                                              | 308 | 15.2.2 约束扭转问题解的程序 .....                                     | 343 |
| 14.1.6 变形位能 .....                                              | 308 | 15.2.3 等剖面单连体杆件问题的解 .....                                   | 344 |
| 14.1.7 考虑初挠度 .....                                             | 308 | <b>15.3 弹性理论的平面问题</b> .....                                 | 346 |
| 14.1.8 向柱坐标系的转换 .....                                          | 309 | 15.3.1 基本概念·方程 .....                                        | 346 |
| <b>14.2 小挠度有限刚度板</b> .....                                     | 309 | 15.3.2 圆形薄板条的特解(平面应力<br>状态) .....                           | 348 |
| 14.2.1 方程及其解法 .....                                            | 309 | 15.3.3 作用在无限大平面上的集中力 .....                                  | 349 |
| 14.2.2 承受强度为 $q$ 的均布载荷作用<br>的两对边自由支持的矩形板 .....                 | 311 | 15.3.4 半平面薄板 .....                                          | 349 |
| 14.2.3 轴向力对板弯曲影响的近似<br>评估 .....                                | 319 | <b>15.4 应力集中</b> .....                                      | 352 |
|                                                                |     | 15.4.1 基本概念和定义 .....                                        | 352 |
|                                                                |     | 15.4.2 平面变形状态下板的应力集中 .....                                  | 353 |
|                                                                |     | 15.4.3 裂纹顶端和尖切口处的应力<br>集中 .....                             | 357 |
|                                                                |     | <b>第一卷 参考文献</b> .....                                       | 359 |



# 第二卷 非弹性系统的计算·稳定性和结构动力学

## 第一篇 非弹性系统的计算

### 第一章 塑性和蠕变理论的基本方程式 ... 363

#### 1.1 弹性极限外材料变形的规律性 ... 363

- 1.1.1 弹性与塑性变形·材料密度与物体形状的变化 ... 363
- 1.1.2 单向应力状态下金属材料在弹性极限外的变形规律性 ... 364
- 1.1.3 在其他简单应力状态下变形的规律性·塑性理论中变形的近似曲线 ... 365

#### 1.2 塑性理论的基本假设及定理 ... 366

- 1.2.1 不同应力状态下的初始屈服 ... 366
- 1.2.2 简单加载与复杂加载 ... 367
- 1.2.3 弹性极限外的变形(强化材料) ... 367
- 1.2.4 加载与卸载准则 ... 368

#### 1.3 塑性理论的类型 ... 369

- 1.3.1 基本方程的组成·应力、应变及其增量的张量和偏量 ... 369
- 1.3.2 塑性状态方程(流变关系) ... 369
- 1.3.3 流动理论的关系 ... 370
- 1.3.4 塑性形变理论的关系 ... 371
- 1.3.5 各种理论的应用范围 ... 371

#### 1.4 解弹塑性问题的方法 ... 371

- 1.4.1 塑性理论问题的分类 ... 371
- 1.4.2 弹塑性变形问题中的逐步近似法 ... 372
- 1.4.3 塑性理论的变分原理 ... 374
- 1.4.4 有关极限状态问题求解的特性 ... 375

### 第二章 梁与板架的极限平衡 ... 376

#### 2.1 有限刚塑性系统极限平衡计算的特性 ... 376

- 2.1.1 基本概念·假定 ... 376
- 2.1.2 有限状态下塑性理论的基本关系 ... 376
- 2.1.3 状态的运动和静力许可条件 ... 378
- 2.1.4 确定极限载荷问题的数学表达式 ... 379
- 2.1.5 梁与板结构的离散 ... 380
- 2.1.6 极限载荷问题的求解 ... 382

#### 2.2 梁剖面的极限状态 ... 382

#### 2.2.1 剖面形状和基本几何特性 ... 382

#### 2.2.2 应力·塑性条件·广义应力与广义变形 ... 383

#### 2.2.3 极限曲面方程·塑性铰·特例 ... 384

### 2.3 单跨梁弯曲时的极限载荷 ... 386

#### 2.3.1 基本关系 ... 386

#### 2.3.2 确定极限载荷的静力学方法 ... 386

#### 2.3.3 确定极限载荷的运动学方法 ... 387

### 2.4 单跨梁弯曲的极限载荷表 ... 388

#### 2.4.1 关于表的说明 ... 388

#### 2.4.2 作用力独立性原理的应用 ... 392

#### 2.4.3 载荷作用的特例 ... 392

### 2.5 多跨梁弯曲极限载荷 ... 392

#### 2.5.1 连续多跨梁 ... 392

#### 2.5.2 阶梯变剖面梁 ... 393

### 2.6 在复杂弯曲与剪切时梁的极限平衡 ... 393

#### 2.6.1 梁在复杂弯曲时的极限状态特性 ... 393

#### 2.6.2 确定在复杂弯曲与剪切下梁的极限载荷 ... 394

#### 2.6.3 当实现梁的剪切塑性机构破坏时翼板的支撑作用计算 ... 396

#### 2.6.4 极限后阶段梁的性能 ... 397

#### 2.6.5 当实现梁的剪切塑性机构破坏时翼板的支撑作用计算 ... 396

#### 2.6.6 极限后阶段梁的性能 ... 397

#### 2.6.7 极限后阶段梁的性能 ... 397

### 2.7 板架的极限载荷 ... 398

#### 2.7.1 基本假设·极限载荷的计算方法 ... 398

#### 2.7.2 具有许多主向梁和交叉构件的规则板架 ... 399

### 第三章 梁和板架的弹塑性弯曲 ... 401

#### 3.1 梁弹塑性复杂弯曲的微分方程式 ... 401

#### 3.1.1 基本关系与假定 ... 401

#### 3.1.2 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.3 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.4 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.5 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.6 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.7 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.8 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.9 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.10 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.11 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.12 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.13 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.14 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.15 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.16 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.17 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.18 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.19 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.20 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.21 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.22 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.23 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.24 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.25 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.26 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.27 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.28 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.29 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.30 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.31 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.32 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.33 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.34 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.35 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.36 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.37 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.38 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.39 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.40 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.41 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.42 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.43 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.44 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.45 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.46 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.47 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.48 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.49 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.50 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.51 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.52 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.53 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.54 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.55 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.56 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.57 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.58 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.59 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.60 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.61 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.62 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.63 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.64 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.65 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.66 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.67 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.68 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.69 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.70 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.71 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.72 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.73 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.74 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.75 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.76 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.77 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.78 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.79 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.80 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.81 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.82 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.83 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.84 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.85 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.86 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.87 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.88 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.89 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.90 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.91 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.92 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.93 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.94 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.95 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.96 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.97 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.98 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.99 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.100 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.101 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.102 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.103 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.104 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.105 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.106 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.107 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.108 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.109 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.110 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.111 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.112 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.113 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.114 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.115 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.116 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.117 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.118 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.119 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.120 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.121 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.122 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.123 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.124 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.125 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.126 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.127 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.128 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.129 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.130 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.131 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.132 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.133 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.134 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.135 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.136 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.137 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.138 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.139 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.140 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.141 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.142 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.143 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.144 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402

#### 3.1.145 非对称薄壁工字型剖面梁的微分方程式 ... 402