

《现代船舶力学》丛书

Buckling Strength of Ship Structures

船舶结构的屈曲强度

束长庚 周国华 著

国防工业出版社

《现代船舶力学》丛书

船舶结构的屈曲强度

Buckling Strength of Ship Structures

束长庚 周国华 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

船舶结构的屈曲强度/束长庚,周国华著. —北京:
国防工业出版社, 2003. 4

(现代船舶力学丛书)

ISBN 7-118-03085-6

I. 船... II. ①束...②周... III. ①船体结构-屈
曲-强度-分析②船体结构-屈曲-强度-计算
IV. U661.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 110602 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)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

开本 787×960 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$ 288 千字

2003 年 4 月第 1 版 2003 年 4 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:45.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教

授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

**国防科技图书出版基金
第四届评审委员会组成人员**

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 殷鹤龄

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 崔士义 蔡 镭

委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓名笔画排序)

刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 彭华良 韩祖南 舒长胜

《现代船舶力学丛书》 编辑委员会

名誉主任委员 黄平涛
顾问 姜来根
主任委员 吴有生

(以下按姓名笔画排序)

副主任委员	王国强	吴德铭	翁长俭	盛振邦
委员	尤子平	石仲堃	冯丹宇	许西安
	刘应中	纪卓尚	杨士莪	吴秀恒
	何友声	张圣坤	陈铁云	耿广生
	徐秉汉	郭日修	崔维成	董世汤
	彭华良	戴仰山	戴遗山	
秘书	陈燮麟	赵德会	康伯霖	

总 序

历史上蒸汽动力装置在船舶推进中的应用,改变了船舶在波浪中的航速与航线,也促进了 19 世纪中期船舶运动理论的诞生。从此,在牛顿力学的基础上,开始了船舶力学漫长的发展历程。于 20 世纪上半叶形成了自身较为系统的专业格局,并且在 20 世纪下半叶取得了突飞猛进的发展。

在 20 世纪后 40 年,随着世界经济大循环模式的形成,船舶的产量、品种大幅增长,船舶设计制造技术频频更新,改变着船舶与海上运输的面貌。21 世纪将是海洋的世纪,海洋经济、海洋开发与海洋军民装备的发展需求更将给海洋运载器技术的进步以前所未有的巨大动力。船舶力学是一个与船舶工程紧密结合的力学领域。船舶类型的每一步更新与发展,都包含着在船舶力学的领域中认识与把握船舶所遭受的随机、复杂、险恶的环境载荷,改进航行性能,保证船体安全可靠等方面的科学与技术的进步。凡是船舶力学研究最活跃的地方,往往就是需求最明确、船舶新技术出现最快的地方。可以说,现代船舶发展的历史,也就是船舶力学发展的历史,船舶力学是船舶技术创新的重要源泉之一,而船舶的工程需求又是船舶力学发展的基石,两者紧密结合,与时俱进。因此,可以预见,进入 21 世纪以后,不用太长的时间,船舶力学发展的历史必将翻到崭新的一页。

面对这样的历史机遇,有必要对世纪之交船舶力学若干主要领域的前沿内容,以及我国船舶科技工作者希望有更多了解的新内容作一些归纳与介绍。这不仅是我国广大船舶科技工作者的愿望,也有助于为进一步发展船舶力学打好基础。

20 世纪 80 年代初以来,我国的船舶工业与船舶技术取得了迅速的发展,船舶总产量在 20 世纪末已稳居世界第三位。为奠定我国船舶技术与船舶工业发展的基础,我国的船舶力学工作者含辛茹苦,摩胼胝地工作,取得了丰硕成果,有的领域接近和达到了国际先进水平。本世纪初是我国船舶工业和船舶技术跨越式发展的重要历史时期,为进一步振兴我国的船舶技术与船舶工业,有必要把所取得的成果与国际动向结合起来,作必要的提炼与总结,供我国船舶与海洋工程界科技人员和高等学校师生参考。

本着上述目的,中国造船工程学会船舶力学学术委员会及部分船舶力学工作者倡议,在世纪之交,组织国内船舶力学的专家们,集体编著一套现代船舶力学丛书。这个倡议很快得到了原国防科工委和国防科技图书出版基金委员会的赞同。

1996 年成立了编委会。编委会的日常工作挂靠在中国造船工程学会船舶力学学术委员会,并在中国船舶科学研究中心的大力支持和国防科技图书出版基金委员会与国防工业出版社的指导下开展工作。

现代船舶力学丛书包括船舶水动力学、船舶结构力学、船舶设计和制造工艺中的力学问题等方面的专著。丛书注重理论与应用相结合,着眼于选题内容相对新颖与先进,并不追求覆盖范围全面与广泛。丛书内容难免会有缺陷与不足,但编委会希望在我国船舶科技界各有关院所、高校与造船企业的关怀和参加编著的专家学者的共同努力下,它的出版能够对推动我国船舶与海洋工程技术的发展,促进我国船舶工业的技术创新,以及加强中外船舶工程界的学术交流有所贡献。

吴有生

2002 年 9 月 8 日

前 言

结构屈曲分析是结构强度理论的一个重要分枝,它对保证结构安全和预定设计功能是至关重要的。随着科学技术的发展,高强度材料的不断出现,以拉应力为主要特征的结构强度不再成为主要问题,而以压应力为主要特征的结构屈曲将成为结构设计中的主要矛盾。与船舶结构类似,在建筑、桥梁、航空、航天工程中都面临着同样的问题。本书的任务将以理论为指导,以设计应用为目的,采用通过试验校核、可供工程设计计算的处理方法,解决与船舶结构屈曲分析有关的理论与计算问题。

本书是作者长期研究船舶结构屈曲强度的理论、试验和工程设计应用的主要成果,并密切联系我国船舶结构和建造材料特点而写就的一本专著,并完成了从设计中来,通过模型试验研究、分析,上升为理论,并用于指导船舶结构设计这样一个完整的认识过程。为反映本书理论的可靠程度,在有关章中都提供了一定数量的试验结果,并与理论解作了比较。本书所有算例,均经作者编程运算和校验,并配备了相关的软件。

在满足结构设计功能,包括保证结构安全的条件下,还需节省材料,其惟一途径就是提高材料强度的利用率。对结构屈曲强度来说,宜采用接近材料屈服极限的高临界应力设计,此时必须考虑材料物理非线性对结构屈曲承载能力的影响。在诸多影响船舶结构屈曲强度的因素中,材料物理非线性的影响将占主要地位。在焊接结构中,焊接残余应力对结构屈曲也有影响。焊接残余应力不一定都是不利的,是利还是弊,应视结构设计而定。但在常规船舶结构设计中,焊接残余应力通常都是不利的。

本书第二章将根据船舶结构屈曲分析的特点和材料试验结果,阐述材料进入屈服平台以前的应力—应变关系及其相似准则,并考虑到对有焊接残余应力的结构作屈曲分析时,应如何建立对所用材料性能的描述方法。第三章研讨了偏心压杆,采用无平衡分枝的第二类稳定性理论分析了 35 根压杆,与试验结果相当一致,并论证了压杆的切线模量理论用于结构的弯曲屈曲分析是偏于安全的。以此奠定了船舶结构弯曲屈曲分析的理论基础。第四章讨论了矩形板的弹塑性屈曲理论和加筋板的极限压缩强度。对受压缩时有减缩的板提出了极值带板宽度、等值带板宽度和板的有效宽度的概念,可以使理论值与板格的试验结果吻合得更好。第五

章介绍了板条有限元理论,它能将第四章的内容拓展到可以考虑高腹板轴压 T 形材的扭转屈曲和腹板的局部屈曲,并能考虑 T 形材在不均匀分布压应力下的屈曲,且有效地分析了一艘大型原油油船的海损事故。第六章为 T 形舱壁扶强材在弯矩作用下的侧向扭转屈曲分析,未考虑材料非线性的影响,但提出了结构屈曲的重根和群根问题,它与弯曲屈曲不同,两简支端间的首阶失稳半波数可以大于一,这在结构屈曲的研究中是值得探讨的问题。第七章为平面板架单向受压的弹塑性稳定性,仅考虑一节点只有三个自由度的平面交叉杆系结构的弯曲屈曲,解决了横向支撑构件刚度对纵向受压构件承压能力的影响,可以把第四章的板格理论扩展到平面板架的力学模型。第八章为船体空间杆系结构的屈曲分析,仍以弯曲屈曲为失效模式,一节点扩大为六个自由度,可以解决舷侧构件对横梁的弹性约束、梁拱以及支柱等对船舶总纵极限弯矩的影响。第九章为计及轴压 T 形材定轴约束扭转屈曲的空间杆系结构的屈曲分析,考虑压杆的弯曲屈曲和扭转屈曲两种失效模式,一节点扩大为九个自由度,第九章是第八章的发展和完善。

从第四章到第九章的内容都是以船舶板架结构为特点来论述的,分析方法是以板的面内刚度远大于面外刚度为基础的,若在板架结构中设置孤立的轴压构件,在其左右两边伴有大的开口,使它失去了大面积板的面内刚度,上述方法就不能采用。为此在第十章论述了压杆的弯扭耦合的屈曲分析,这使包含孤立纵向受压构件的板架结构的屈曲分析能得以解决。压杆弯扭耦合的屈曲解既小于轴压弯曲屈曲解,又小于轴压扭转屈曲解。由于实际使用的需要,这类结构形式颇受设计人员的青睐,目前已广为应用,但对它的屈曲承载能力的研究还未引起船舶结构设计人员的足够重视。

最后一章论述了船舶结构的总纵极限强度,当然它是由主甲板/船底结构的屈曲极限承载能力所决定的。该章将综合应用本书提供的各章有关理论,采用多种力学模型和一阶及高阶屈曲特征值的方法分析了若干只模型试验,以探讨船舶结构屈曲极限强度(包括总纵屈曲极限弯矩和平面板架结构的极限压力)合理的力学模型和计算方法,并论述了工程设计计算方法的可靠程度。

本书的部分内容已编入我国《水面舰船结构设计计算方法(规则)》和规范中,已在指导我国水面舰船的结构设计计算,但大部分内容,如焊接残余应力、极值带板宽度、T 形材的轴压扭转屈曲和压杆的弯扭耦合屈曲等,已在理论上做到了初步完善,有的已被若干试验所证实,但要用于实际还需时日。这将是 21 世纪船舶结构强度研究人员、工程设计和使用人员需要共同努力解决的课题。

作者有幸为船舶结构的屈曲强度倾注了大量的心血,但我们还要特别感谢该课题的开拓者郭可评和郭武德两位学长以及施用耀先生;此外,该课题能得以不断深化、发展并能在设计中得到应用,为我国的船舶结构的发展作出贡献,得益于七〇一所船舶结构设计人员的大力支持和帮助;陈铁云教授和郭日修教授审阅了

初稿,提出了极其宝贵的意见。在此一并表示我们衷心的感谢!

本书能获得国防科技图书出版基金的资助出版,并获得国防工业出版社有关人员耐心细致的合作,作者深表谢意。

本书可供有关专业研究人员和船舶结构设计人员阅读,亦可供大专以上学生和有关高等院校教师参考。就结构计及材料物理非线性和焊接残余应力的屈曲强度来说,也能为建筑、桥梁、航空、航天工程界的科研、设计人员借鉴。

船舶结构的屈曲强度是船舶结构设计中的敏感问题,也是当今造船界的热点研究课题,限于作者的学识水平有限,本书不完善的地方甚至于错误之处在所难免,作者恳请广大读者批评指教。

内 容 简 介

本书在计及材料物理非线性和焊接残余应力的条件下,采用解析法、半解析法和解析有限元法求解了矩形板、加筋板、复杂加筋板、船舶板架结构和船体分段的屈曲和极限压缩强度(弯矩)问题;其失效模式包括板的屈曲、压杆(板架)的弯曲屈曲、T形材定轴约束扭转屈曲和孤立压杆的弯扭耦合屈曲等。为论证方法的可靠程度,本书提供了若干试验结果并与理论解作了比较。对在弯矩作用下的舱壁T形扶强材的侧向扭转屈曲也专门作了论述,揭示了结构屈曲强度中的群根和重根现象。

本书可供有关专业研究人员、船舶结构设计人员、大专以上的学生、有关高等院校教师参阅,也可供建筑、桥梁、航空、航天领域的科研、设计人员借鉴。

Buckling behaviour and ultimate compressive strength of rectangular plates, stiffened plates, panels, grillages and hull girders in ship structures are investigated by means of the analytical solution, semi-analytical solution and finite element methods. Nonlinearity of material properties above elastic limit for structural steel used in ship-building and welding induced residual stresses are taken into account. Failure modes involve buckling of plates, flexural buckling of compressive members (included grillages), restraint-torsional buckling of T girders about an enforced axis of rotation and flexural-torsional coupled buckling of isolated girders etc. In this Book a lot of experimental results are provided in comparison with the calculations based on presented methods for purpose of checking their validity. Tripping failure of bulkhead stiffener subjected to bending moment is specially described. Phenomena of multiple roots and group-roots existing probably in analysis of buckling strength are revealed, which were neglected previously.

This Book may be suitable to reference for professional researchers, ship structure designers, teachers of relevant colleges and universities and under-graduates as well as may be also useful to scientific researchers and designers in civil, bridge, aeronautics and aerospace engineerings, who are interested in this field.

目 录

第一章 绪论	1
第二章 船舶结构屈曲分析需要的材料性能参数	8
2.1 材料应力—应变关系的重要性	8
2.2 材料应力—应变关系的数学形式	9
2.3 材料应力—应变关系的相似准则	14
2.3.1 材料曲线的相似准则	16
2.3.2 相似材料曲线的性质和推论	16
2.4 材料曲线相似准则的应用实例	17
2.5 计及残余应力后的平均应力—应变曲线	19
2.5.1 不受外力时,具有焊接残余应力构件的内应力平衡条件	20
2.5.2 平均工作应力与工作应变的关系	21
2.5.3 平均工作应力与工作应变曲线关系的分析	22
2.6 计及残余应力后的压杆修正曲线	27
2.7 在工程计算中计及残余应力的处理方法	28
参考文献	29
第三章 矩形剖面偏心压杆的极限承压能力	30
3.1 压杆稳定性	30
3.2 在弹塑性范围内偏心压杆的轴向压力与弯矩的关系	33
3.2.1 压杆材料的应力—应变关系	33
3.2.2 对数幂函数的两个积分与辅助函数	34
3.2.3 $b \times h$ 矩形剖面压杆弹塑性复杂弯曲时的轴 向力与弯矩计算	34
3.3 压杆的位移函数与轴向力及弯矩的关系	37
3.4 偏心压杆屈曲的一般准则	38
3.5 轴向力偏移量 δ_p 及偏心距 δ 的取法	39
3.6 对矩形剖面压杆稳定性试验结果的分析	40
3.6.1 对压杆试验的理论分析	40
3.6.2 不计轴向力偏移量 δ_p 的理论分析	43

3.6.3 材料性能改为渐变屈服平台后的解	43
3.6.4 $\sigma_{cr} < 0.85\sigma_y$ 压杆试验值偏高原因的分析	46
3.7 分析与结论	47
参考文献	47
第四章 矩形板的弹塑性屈曲与加筋板的极限压缩强度	48
4.1 弹塑性矩形板屈曲理论中的物理关系	49
4.1.1 弹性物理关系	51
4.1.2 Stowell 理论的物理关系	52
4.1.3 Bleich 理论的物理关系	52
4.2 计及焊接残余应力弹塑性矩形板临界应力公式的推导	53
4.2.1 焊接残余应力沿板宽方向的分布及有关参数的选取	53
4.2.2 短边受压长矩形板临界应力公式的导出	54
4.3 带板纵骨临界应力公式	57
4.4 板的极限压缩强度	58
4.5 纵骨的带板宽度与带板的有效宽度	58
4.5.1 等值带板宽度	59
4.5.2 极值带板宽度	59
4.5.3 带板纵骨的承压能力	60
4.5.4 对 $\sigma_{up} = \sigma_{cr}$ 条件的分析	60
4.5.5 极值带板宽度的优点	60
4.6 对文献[4.3]试件的计算分析	61
4.7 对两种带板宽度的分析	65
参考文献	66
第五章 弹塑性屈曲的板条有限元理论及复杂加筋板结构的屈曲(极限)强度	67
5.1 板条有限元的基本理论	68
5.1.1 本书板理论的板条有限元单元矩阵方程的导出	68
5.1.2 修正的 Stowell 板理论的板条有限元矩阵方程	72
5.1.3 Stowell 板理论的板条有限元矩阵方程	73
5.1.4 Bleich 板理论的板条有限元矩阵方程	73
5.1.5 弹性板理论的板条有限元矩阵方程	74
5.2 梁(杆)元与板条有限元单元矩阵方程的关系	74
5.3 板条有限元的边界约束处理	75
5.4 焊接残余应力在板条有限元中的处理	78
5.4.1 加筋板结构屈曲时的承压能力和临界应力	79

5.4.2 加筋板结构的极限承压能力和极限应力	80
5.4.3 加筋板结构的极限应力 σ_u 和平均极限应力 $\bar{\sigma}_u$	80
5.5 关于加筋板结构采用板条元离散的说明	81
5.6 复杂加筋板结构屈曲强度和极限强度的提法	82
5.7 算例	82
5.8 评述	88
参考文献	89
第六章 舱壁扶强材在弯矩作用下的侧向扭转屈曲	90
6.1 T形舱壁扶强材侧向扭转屈曲的微分方程及其通解	90
6.1.1 三角函数表示的形函数	92
6.1.2 双曲函数表示的形函数	92
6.1.3 三角函数和双曲函数共同表示的形函数	93
6.2 在弯矩作用下T形剖面梁元稳定性矩阵方程的解析形式	93
6.2.1 形函数为三角函数的稳定梁元矩阵方程	93
6.2.2 形函数为双曲函数的稳定梁元矩阵方程	96
6.2.3 形函数为混积函数的稳定梁元矩阵方程	96
6.3 工字形剖面梁的几何参数	97
6.4 作用在扶强材上的弯矩的选取及对纯弯曲解的讨论	97
6.4.1 三种形函数与舱壁扶强材特征根的关系	97
6.4.2 舱壁扶强材侧向扭转屈曲的重根与群根	98
6.4.3 侧向扭转屈曲的首阶失稳半波数	100
6.4.4 实例计算对上述理论的验证	101
6.4.5 失稳波形的不正则性	102
6.4.6 $a_1 = b_1$ 和 $a_3 = 0$ 或 $b_3 = 0$ 的稳定性解	102
6.5 舱壁板的刚度对舱壁扶强材侧向扭转屈曲的影响	103
6.6 变弯矩作用下的解	104
6.7 材料非线性对承载能力的影响	105
6.8 轴向力与横向载荷共同作用下的承载能力	106
6.9 舱壁结构稳定性的提法	106
6.9.1 不计轴向压力时,舱壁结构在水压力作用下的T形扶强材的侧向扭转屈曲分析	106
6.9.2 计及轴向压力时,舱壁结构在水压力作用下的T形扶强材的侧向扭转屈曲分析	107
参考文献	107
第七章 纵向受压平面板架的弹塑性稳定性	108

7.1	压杆的中性微分方程及其通解	109
7.2	混合解法单元矩阵方程的形式	110
7.2.1	压杆单元矩阵方程的解析形式	110
7.2.2	弯曲杆元矩阵方程的解析形式	112
7.2.3	在单向受压平面正交板架中应用的两种 混合杆元矩阵方程	113
7.2.4	混合解法稳定杆元单元矩阵方程的解析性	114
7.3	位移解法单元矩阵方程的形式	115
7.3.1	压杆单元矩阵方程的解析形式	115
7.3.2	弯曲杆元单元矩阵方程的解析形式	116
7.3.3	在单向受压平面正交板架中应用的两种 稳定杆元矩阵方程	116
7.3.4	位移解法稳定杆元单元矩阵方程的解析性	117
7.4	多项式位移函数压杆的单元矩阵方程	117
7.4.1	杆单元的刚度矩阵方程	117
7.4.2	杆单元的初应力矩阵方程	117
7.4.3	解的近似性	118
7.5	两种解法优缺点分析	119
7.6	平面板架模型稳定性计算的边界约束处理	119
7.6.1	第一类边界约束处理	119
7.6.2	第二类边界约束处理	120
7.6.3	结构对称性条件的处理	121
7.6.4	特殊约束处理	121
7.7	特征方程的求解	121
7.7.1	混合解法中的屈曲特征值与特征指数的关系	122
7.7.2	位移解法中的屈曲特征值与特征指数的关系	122
7.7.3	失稳波形的分布	122
7.7.4	在本书中应用的特征方程解法	123
7.8	本章方法的可靠性	123
7.8.1	对支撑在独立弹性支座上连续梁稳定性的考证	123
7.8.2	对文献[7.2]中所示的一些平面板架稳定性例题的分析	124
7.8.3	对文献[7.2]中设有支柱板架稳定性解的讨论	126
7.8.4	对文献[7.2]中 φ 值的讨论	129
7.8.5	关于柔性系数 A 的讨论	130
7.8.6	对文献[7.2]解法的评价	131