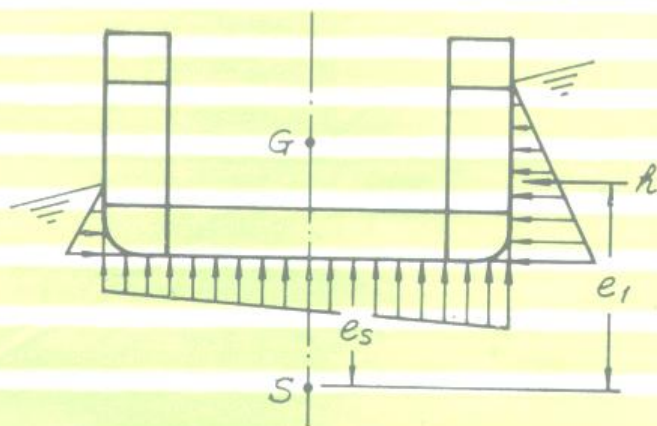


杨永谦 著



人民交通出版社

U661.4
Y30

413515

大开口船舶结构计算力学

Dakaikou Chuanbo Jiegou Jisuan Lixue

杨永谦 著

人民交通出版社

(京)新登字 091 号

DZ30/02

内 容 简 介

《大开口船舶结构计算力学》阐述了甲板大开口船舶(包括集装箱船、内河双壳槽型分节驳及某些多用途货船和矿砂船等)的弯、扭强度,内容包括:弯、扭外力实用计算方法;内力计算有以薄壁梁理论为基础的有限梁法、半无矩壳理论方法、迁移矩阵纵横耦合分析方法及串联多级子结构有限元技术;船体薄壁梁动力分析、流固耦合分析以及应用相似理论进行模型试验及实船应力推证技术等,最后还简要介绍了大开口船舶弯、扭组合分析程序系统(SCLOS)。

本书适用于船舶与海洋工程专业高年级学生、研究生及教师,也可供从事船舶结构研究、设计、建造及检验的工程技术人员参考。

大开口船舶结构计算力学

杨永谦著

正文设计:徐祖兴 责任校对:吕 涛

人民交通出版社出版

本社发行

(100013 北京和平里东街 10 号)

武汉市长江印刷厂

开本:787×1092 1/32 印张:10.75 字数:234 千

1994 年 2 月第 1 版

1994 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

印数:0001-1000 定价:12.50 元

ISBN 7-114-01881-9

U · 01247

前 言

大开口船舶装卸效率高,是现代发展的主要船型。集装箱船舶运输已在国际航运中占主导地位,也是我国“八五”期间重点发展船型。内河双壳槽型分节驳已成为长江货运主力。但是长大甲板开口的存在严重地削弱了船舶总纵强度和扭转强度,其弯扭强度计算已成为这类船舶设计、建造及检验的主要问题。本书全面地阐述了大开口船舶弯扭强度计算方法,动力分析及模型试验等,大部分内容都是作者及其课题组近年来的研究成果,其中大多数已在国内学术会议上宣读或刊登在国际学术会议文集、全国性学术会议文集或学术刊物上,有的还获得优秀科研成果奖和国家科技进步奖。

本书第一章介绍作用在船体上的扭转外力,除阐述扭转外力产生的一般机理外,着重介绍了斜浪中弯扭外力的实用计算方法及对传统方法的改进和程序实施。

第二章介绍以薄壁梁理论为基础的有限梁法。作者及其课题组改进和完善了现有船体薄壁梁分析方法,并给出按中国船级社规范要求的计算实例。

第三章介绍应用半无矩壳理论进行船体弯、扭分析方法。该方法优于薄壁梁方法,在船舶结构静、动分析中有广阔应用前景。

第四章提出一种应用迁移矩阵法进行大开口船舶纵、横强度耦合分析方法。

第五章应用串联多级子结构技术对大开口船进行有限元分

析,利用结构模式和单元模式可大大提高分析效率,改善了常规有限元法的缺陷,并提出一种二维元与船体薄壁梁单元的广义主从耦合计算模型,可有效地用于分节驳强度计算。

第六章介绍应用薄壁梁理论对大开口船进行动力计算,导出了扭转质量矩阵;对行列式搜索法进行改进,可排除刚体模态,适用于在水中为自由体的船舶振动频率计算。

第七章为大开口船流固耦合分析,主要介绍了流固耦合基本方程及其解法,边界元法的应用等。作者目前已获得国家自然科学基金的资助,继续这个问题的研究。

第八章将相似理论应用于船舶结构模型试验中,主要目标是用模型试验结果预测实船的应力。由于板厚等不能按同一几何尺寸比例缩小,使模型产生畸变,作者及其课题组在这方面进行了研究,并已成功地应用于国家“七五”科技攻关项目的模型试验中。

第九章简要地介绍了“大开口船舶弯扭组合分析程序系统”,已经进行了多艘各类大开口船(包括集装箱船)的强度计算,取得了明显地经济和社会效益。

为了方便读者阅读,对各种计算方法的力学原理的阐述力求简明、概念清楚,必要的公式都给出推导过程。对于薄壁梁约束扭转理论、半无矩壳理论及相似理论等基础知识也作了简要介绍。大部分数值计算方法都给出了计算框图和算例,为了检验计算方法和程序的可靠性,还给出了一些模型试验结果加以验证。每一章后面都列出了参考文献,供读者查阅。

本书提供的方法不仅适用于大开口船舶结构分析,对其它类型船舶(非大开口船舶)也是适用的。并且将传统的船舶强度中把总纵强度与横向强度孤立起来的计算方法进行了推进和发展,使其能综合进行拉(压)弯、扭及横向变形的耦合计算。

本书的出版希望引起造船界同行对大开口船舶强度问题的兴趣并进一步发展和完善。

本书撰写和出版得到了武汉水运工程学院领导的大力支持。船舶结构力学专家、海军工程学院郭日修教授审阅了全书,提出了许多宝贵意见并撰写了序言,作者表示衷心感谢。本书撰写还得到严仁军、张少雄及陈凤兰等同志的大力协助,在此一并表示感谢。

由于时间短促和作者水平所限,书中错误不妥之处希望读者批评指正。

杨永谦

1993. 2

目 录

序.....	(1)
绪 论.....	(4)
参考文献	(11)
第一章 作用在船体上的扭转外力	(13)
§ 1.1 船舶斜浪航行时引起的扭转力矩.....	(13)
§ 1.2 船舶倾斜时的扭矩.....	(18)
§ 1.3 摇摆时引起的扭矩.....	(20)
§ 1.4 扭转强度计算的标准状态及扭矩计算实 用(规范)公式.....	(23)
§ 1.5 斜浪中弯扭外力的直接算法及其程序.....	(27)
参考文献	(39)
第二章 大开口船体弯扭分析的有限梁法	(40)
§ 2.1 等直薄壁梁扭转理论概述.....	(40)
§ 2.2 应用剪流理论计算多闭室船体薄壁梁剖 面特性参数及程序实施.....	(55)
§ 2.3 船体薄壁梁计算模型及剖面协调处理.....	(66)
§ 2.4 横向加强构件对船体薄壁梁扭转的影响.....	(82)
§ 2.5 扭转时舱口变形的计算.....	(93)
§ 2.6 有限梁法程序框图、集装箱的弯扭强度校 核实例.....	(95)
§ 2.7 有限梁法算例及模型试验比较	(102)
参考文献.....	(109)

第三章 应用半无矩壳理论进行船体弯扭强度分析.....	(111)
§ 3.1 半无矩壳理论及其微分方程组的建立	(111)
§ 3.2 船体半无矩壳理论计算模型	(120)
§ 3.3 船体突变剖面间的协调处理	(128)
§ 3.4 船体半无矩壳计算程序 SSEM 及算例	(129)
§ 3.5 半无矩壳理论的综合讨论	(135)
参考文献	(143)
第四章 应用迁移矩阵法进行大开口船体的纵横强	
度耦合分析	(145)
§ 4.1 迁移矩阵法	(145)
§ 4.2 大开口船体纵横强度耦合计算	(151)
§ 4.3 迁移矩阵运算的数学处理和计算实例	(175)
参考文献	(179)
第五章 应用串联多级子结构法进行大开口船体的	
有限元分析	(181)
§ 5.1 子结构法理论基础与串联多级子结构计	
算模型	(181)
§ 5.2 各类单元的理论模型及最小二乘法拟	
合的应力输出	(191)
§ 5.3 串联多级子结构程序的结构与特点、算	
例	(200)
§ 5.4 船体薄壁梁与空间膜元的广义主从计	
算模型	(208)
参考文献	(210)
第六章 船体薄壁梁动力分析	(211)
§ 6.1 船体薄壁梁动力分析理论模型	(211)
§ 6.2 行列式搜索法及其改进	(225)

§ 6.3 船体振动的附加质量	(237)
§ 6.4 船体半无矩壳理论动力分析	(240)
参考文献	(247)
第七章 大开口船舶的流固耦合分析	(249)
§ 7.1 流固耦合基本方程	(249)
§ 7.2 流固耦合方程的数值解法	(255)
§ 7.3 边界元法在流固耦合问题中的应用	(258)
§ 7.4 求解速度势时对称面条件的应用	(263)
§ 7.5 船体薄壁梁的流固耦合数值计算实例	(267)
参考文献	(269)
第八章 相似理论在大开口船体模型实验中的应用	(270)
§ 8.1 相似理论与模型试验	(271)
§ 8.2 相似理论在分节驳结构模型试验中的应 用	(277)
§ 8.3 分节驳应力经验公式的相似理论推导 方法	(292)
§ 8.4 应用薄壁梁理论对大开口船体进行相似 分析	(301)
8.5 大开口江海直达运粮船结构模型试验	(307)
参考文献	(320)
第九章 大开口船舶弯扭组合分析程序系统(SCLOS)	(321)
§ 9.1 SCLOS 程序系统的功能与特点	(321)
§ 9.2 SCLOS 程序系统的使用方法	(326)
§ 9.3 大开口船舶弯扭强度计算说明	(330)
参考文献	(333)

序

船舶结构是由大量构件（杆、板）组合的复杂的空间结构。传统的船舶结构分析方法是将总纵强度与横向强度分别计算，在总纵强度计算中，又将船体总纵弯曲应力与构件的局部弯曲应力分别计算，然后叠加。船体总纵弯曲计算采用 Euler—Bernoulli 梁模型，船体总振动计算有时也采用 Timoshenko 梁模型。之所以这样处理，是由于船舶结构的复杂性和过去人们计算能力的不足，迫使人们不得不对计算模型作很多简化，以便有可能计算。但船舶结构是个整体，各部分结构之间是相互作用的，按传统方法分别计算的结果不能正确反映实际的船舶结构行为。然而，采用计算方法估算船舶结构强度比起更早的经验方法，仍是个进步，因此，传统的船舶结构分析方法及与之相匹配的外力计算方法和强度标准三者结合的船舶结构设计计算规则，作为比较强度方法，至今仍沿用。

1960 年，R. W. 克拉夫提出有限元方法，它是从杆系结构力学中的变位法得到启发而建立起来的。有限方法和电子计算机结合，产生了巨大的威力，应用范围很快从简单的杆、板结构推广到复杂的空间组合结构。以此为契机，一个新的分支——计算结构力学迅速建立，并且在船舶结构领域广泛地应用。现在，用有限元方法可以按整体结构对船舶作详细的应力分析，可以达到很高的精度，能正确反映船舶结构的行为。但是，用有限元方法计算大型、复杂的组合结构，数据量大，所需的人

力和机时多,对计算机容量的要求高,计算费用大,这就使有限元方法的应用,尤其是在设计初始阶段的应用带来不便。因此,有限元法也在其应用过程中不断地发展,其中一个重要的发展方向是解析方法与数值方法的结合。例如有限条法,即是在结构的一个方向采用解析处理,而在另一个方向则采用数值处理。这样,在一定程度上有解析法的严密性,又减少了数值法的数据量,便于在计算机上实施。这种解析与数值的结合,称为半解析法,也有人称为数值解析法。

20世纪60年代,大开口船舶——集装箱船、多用途货船、内河分节驳等问世,甲板大开口严重削弱了船体总纵强度和扭转强度,大开口船舶的扭转强度上升到与总纵强度同等重要的地位。采用传统的总纵弯曲计算模型——简单梁模型,已不能正确处理大开口船舶的弯、扭强度问题。因此,探讨大开口船舶的强度计算方法便成为船舶结构力学的一个重要课题。1979年我国曾出现5000t分节驳断裂事故,更引起国内学者对大开口船舶强度问题的关注。

80年代初以来,杨永谦教授和他主持的课题组对大开口船舶的强度计算方法开展了系统的研究工作,并得到国家自然科学基金资助。他们在薄壁梁理论和半无矩壳理论的应用、有限元计算中的串联多级子结构技术、横向加强构件对船体扭转的影响、船体结构模型试验中相似理论的应用以及大开口船舶弯扭组合分析程序系统的开发等方面,取得了丰硕的、创造性的成果。在此基础上,他们发表了一系列有关大开口船舶强度计算方法的论文,受到同行专家的高度评价,有的还取得国家科技进步奖。

杨永谦教授撰写的《大开口船舶结构计算力学》一书,综合了作者及其课题组多年来的科研成果,全面、系统地阐述大

开口船舶弯、扭强度计算方法。书中既有外力计算、也有内力计算方法；既有静力计算、也有动力计算方法；既阐述了以薄壁梁理论和半无矩壳理论为基础的半解析法，也有迁移矩阵和有限元等数值方法，书末还介绍了大开口船舶弯扭组合分析程序系统、全书内容充实、层次分明、说理清晰、分析深入、理论联系实际，文字流畅易读。这样一本关于大开口船舶弯、扭强度计算方法的专著，以往未曾见过，这是一项创举。这对从事船舶结构力学和船舶结构设计、建造的工程技术人员是大有裨益的。

此书即将出版，爰写此序，以向读者推荐。

郭日修

1993. 3. 3 于武汉

绪 论

甲板上具有长大货舱开口的船舶可以大大提高装卸效率,因此,它已成为现代的主要发展船型。集装箱船,内河双壳槽型分节驳已成为航运主力。此外,矿砂船,某些多用途船也具有较大甲板开口。它们的特点是,舱口宽度已超过船宽的 80%,舱口长度达到舱壁间距的 90%,大大超过普通货船,使船体抗扭刚度严重削弱,扭转强度的重要性已上升到与总纵强度同等地位。

图 0.1 给出一种典型的集装箱船的布置图。

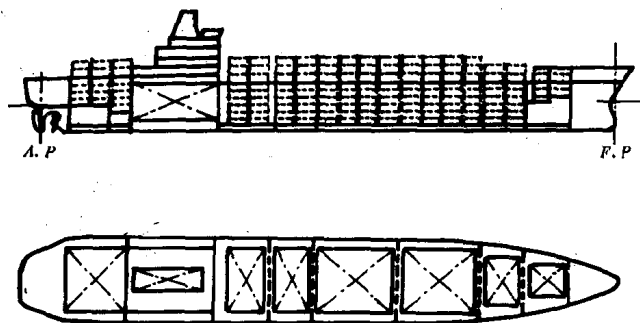


图 0.1

图 0.2a)为集装箱船的横剖面型式,图 0.2b)为槽型及其它大开口船的横剖面型式,其中单舷结构对抗扭尤为不利。为了增加抗扭能力,一般都有闭室结构及在舱口间设置横向抗扭箱或甲板条。由于大开口的存在,使船体剖面变化显著间断,因此不

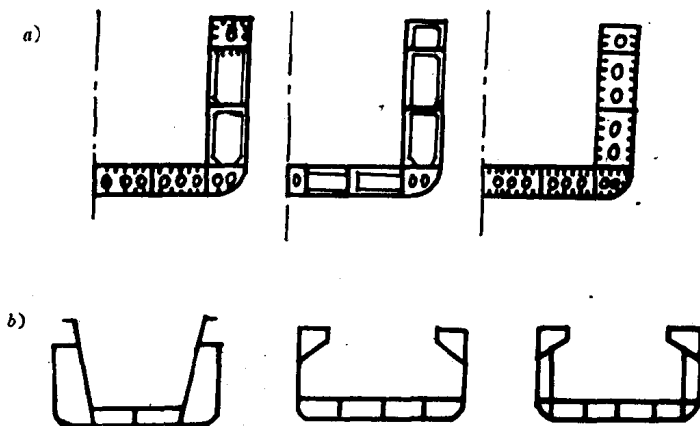


图 0. 2

能用传统的方法把船当作一根等值梁来计算,此外普通梁理论也没有研究扭转问题。目前,船体扭转强度的计算方法已有多种,归纳起大致可分为三类:

(1)将船体理想化为薄壁梁,用薄壁梁约束扭转理论进行计算;

(2)把船体离散为板、梁、杆单元,用常规有限元法计算;

(3)将船体视为一空间薄壳,用半无矩壳理论进行计算。

1905 年, Timoshenko 首先研究了工字型薄壁梁的约束扭转问题。1936 年, Власов 采用了一些变形假设,以确定开口薄壁梁横截面上约束扭转应力变形规律,合理地简化了计算方法,建立了适用于开口薄壁梁约束扭转的经典薄壁梁理论^[1]。该理论基于如下两个基本假定:

(1)梁在扭转时横截面投影形状不发生改变(刚周边假设);

(2)梁在扭转时中面上无剪变形,即忽略由翘曲变形引起的二次剪应力。

由此可以导得开口薄壁梁扭转时的翘曲位移

$$w(x, s) = -\varphi'(x)\omega(s) \quad (0.1)$$

式中: $\varphi'(x)$ ——扭率;

$\omega(s)$ ——扇性坐标; $\omega(s) = \int_0^s \rho ds$ (ρ 为计算点到扭心的距离。平衡微分方程为

$$EI_\omega \varphi'' - GK \varphi'' = -m_t \quad (0.2)$$

式中: EI_ω 、 GK ——分别为翘曲扭转和自由扭转刚度。

1967年, De wilde 最早将经典薄壁梁理论应用于大开口集装箱船计算中⁽²⁾,他把整个货舱部分的船体视为两端有翘曲约束的等断面薄壁梁,首尾部分作为边界条件考虑。该法没有顾及船体非棱柱的特点,同时把同一剖面按两种不同处理方法得到的翘曲刚度和自由扭转刚度放在同一微分方程中求解也是矛盾的,而且应用经典薄壁梁理论于闭口剖面也会带来较大误差。

Kawai⁽³⁾把船体划分成若干个等断面阶梯形薄壁梁段进行计算,称为有限梁法(Finite Beam Method),应用经典薄壁梁理论,扭转角位移函数取三次多项式,推导出单元扭转刚阵,用一维有限元法进行求解。它比常规有限元法数据量小,计算速度快,但对封闭域的船体计算有较大误差,且没有考虑船体不同剖面间的协调。

对于闭口薄壁梁,中面上的剪应变由 Bredt 剪应力 τ_s 引起,忽略翘曲剪变形将会引起较大误差。Kollbrunner-Hajdin 提出了修正理论⁽⁴⁾,引进一个翘曲函数 $\theta(x)$ 代替 $\varphi'(x)$,将翘曲位移表达为

$$w(x, s) = -\theta(x)\omega(s) \quad (0.3)$$

该式实质是把翘曲剪应变影响考虑在 $\theta(x)$ 中。式中 $\omega(s)$

$= \int_0^s \left(\rho - \frac{\tau_b}{G\varphi'} \right) ds$ 。根据 $\theta(x)$ 与 $\varphi'(x)$ 间的关系, 翘曲位移 $w(x, s)$ 可用扭转角表示为

$$w(x, s) = -\omega(s)\varphi' - \rho^2 \frac{EI_\omega}{GI_\omega} \omega(s)\varphi''(x) \quad (0.4)$$

式中: ρ ——翘曲修正系数, $\rho = I_\omega / (I_\omega - I_t)$;

I_ω ——剖面翘曲中心距, $I_\omega = \int_A h^2 dA$ 。

可见修正理论的翘曲 w 不仅与 φ' 有关, 还与 φ'' 有关, 比经典理论发展的了一步。

Streneroth^[5]利用修正的薄壁理论进行了集装箱船的扭转分析, 并用虚长度法, 计算船端约束。该法未考虑船体非棱柱性, 并且虚长度无法准确确定, 计算也是粗糙的。

Haslum 和 Tonnessen^[6]应用修正的薄壁理论, 用迁移矩阵法进行求解, 并首次提出不同剖面间的协调准则, 引入翘曲相容因子 α 使翘曲函数 θ 达到协调,

$$\theta_l = \alpha\theta_r \quad (0.5)$$

式中下标 l 及 r 分别表示连接点左边和右边剖面。同时也考虑了扭矩和双力矩的协调。Haslum 较好地处理了不同剖面间的协调问题。波兰船舶研究中心 1979 年发表的研究报告^[7], 对 Haslum 协调准则进行了检验, 认为大体上是吻合的。但是 Haslum 方法中没考虑扭转与水平弯曲的耦合。

1982 年, Gunlaugssen 和 Pedersen^[8]应用修正的薄壁梁理论, 导出空间薄壁梁的拉(压)、弯、扭耦合方程组, 并用一维有限元法进行求解, 对于船体突变剖面间的协调采用了最小二乘意义上的协调方法, 即使 $\int_{AC} (w_l - w_r)^2 dA$ 获得最小值, 其中 w_l 和 w_r 分别为公共剖面左、右同一点的翘曲位移。但 Pedersen 方法坐标转换矩阵只适用于开口剖面形式, 且未计及船体薄壁梁水平弯

曲与扭转的耦合。作者及其课题组的研究工作进一步完善了船体薄壁梁的分析方法⁽⁹⁾。国内,陈伯真教授等在这方面也作了理论和应用研究⁽¹⁰⁾,推进了薄壁梁理论在船体分析中的应用。

薄壁梁理论的进一步发展,是 Pittaluge 提出的一种薄壁梁修正的新理论⁽¹¹⁾。此理论放弃了剪切变形的假设,从弹性力学平衡方程和边界条件出发,应用 St. Venant 半逆解法确定原设定的待定函数。此外,Pittaluga 对薄壁梁的剪心和扭心作了区别定义,并导出它们之间的关系,得到扭心是外力函数,这一点已被试验证实。但由于该方法计算繁冗在应用上受到限制。

以上理论都没有考虑周边畸变,即刚周边假设仍然成立。李国豪教授引进了剖面可变形的薄壁梁弯曲理论⁽¹²⁾,它能适用于形状比较简单的桥梁计算,但对复杂的船体剖面计算遇到困难。

综观以上,薄壁梁理论应用于船体弯扭计算,其优点是方法简单,计算效率高,但其缺点也是不容忽视的。这些缺点是薄壁梁理论的基本假设造成的。刚周边假设忽略了船体结构实际发生的横向扭曲变形,文献〔13〕指出,横向扭曲变形对船体结构的应力状态有较大影响。薄壁梁理论的第二个假设忽略了二次剪应力的影响,导致薄壁梁理论本身无法自圆其说,也带来了突变剖面间的翘曲位移不协调,尽管 Haslum、Pedersen 等人提出了处理方法,也只能作到运动和力的共轭条件在整体意义上被满足。

应用常规有限元法进行整船解析,即将船体离散为板、梁、杆单元,做三维空间分析。其优点是计算技术成熟,精度高,船舶总体和局部强度趋向统一,可适用于任何载荷情况,由 Tanaka 等对集装箱船《Australia—Malu》所作的有限分析可见一般⁽¹⁴⁾。但是,常规有限元法的缺点是公认的,数据量巨大,花费高昂,难于推广应用。作者采用串联多级子结构技术,利用同构模式对长江 1000t 分节驳模型作了计算分析,使得工作量有所减轻并能