

Y 855785

分类号 _____

密 级 _____

U D C _____

单位代码 10151 _____

基于国际新规则的散货船强度控制研究

李 荣 辉

指导教师 沈 华 职称 教 授

学位授予单位 大 连 海 事 大 学

申请学位级别 硕 士 学科与专业 载运工具运用工程

论文完成日期 2006 年 3 月 论文答辩日期 2006 年 3 月 25 日

答辩委员会主席 _____

摘 要

散货船运输在海上货物运输中所占的地位日益重要。近来频频发生散货船事故表明：船体结构强度问题是影响散货船安全的主要因素。为此，国际船级社协会（IACS）和国际海事组织（IMO）采取了大量措施，发布了很多对散货船生效的新规则。诸多新规则的实施，对航运中散货船的船体强度控制也提出了新的要求，按照传统强度校核方法认为安全的工况，根据新规则校核却不一定安全。在航运生产实践中，航海人员缺乏对新规则的了解，忽视新规则提出的对散货船强度控制的要求。基于此，本文在传统的船舶强度控制方法基础上，着重研究了国际船级社协会统一要求 URS17 和 S25 的实施对营运中散货船船体强度控制的影响和应对方案问题。

在总纵强度方面，IACS UR S17 提出了散货船满足考虑任一货舱进水的总纵强度要求，本文研究了考虑任一货舱进水后总纵强度的校核方法，在此基础上，提出了方便应用的计算船舶破损后剩余强度的简化方法。在局部强度方面，为保证舱底单位面积负荷量不超过允许值，本文根据固体散货休止角和密度建立了货舱最大允许载货量近似计算方程，并编制了方便使用的计算程序；根据 IACS URS25 中增加的局部强度校核要求，研究了每一货舱及相邻两货舱的载货量限额与吃水函数关系曲线的确定方法和该曲线在实践中的应用方法，编制了适用 BC-A 协调标志散货船确定作为吃水函数的每一货舱及相邻货舱装货量极限的计算程序，并绘制了货舱吃水与货舱载货量限额的函数关系曲线，供航海人员在生产实践中使用；最后，通过实船计算，结合航运中可能或经常发生的危险工况，研究了新规则的生效对营运中散货船强度控制的影响，找出危险工况的特点及发生的原因，并提出了航运界人士在进行散货船强度控制时应注意的问题及应对方案。

本文旨在提醒并指导航海员遵照国际规则加强散货船强度控制，减小营运中存在的风险。文中一些关于散货船强度控制的观点也是来源于笔者多年航海实践经验的积累，可以供航运界有关人士在实践中参考和借鉴。

关键词：散货船；船体强度；国际船级社协会统一要求

Abstract

Bulk carrier transportation is a major and rapidly expanding sector in the world merchant fleet. Recently, frequent accident indicates that hull strength is the main factor that affects the safety of ship in ocean transportation. IACS and IMO focused attention on hull structure strength and take many actions. A series of new IACS unified requirements and IMO regulation have been issued with regard to the ship structure safety. These requirements/ regulation have produced some new requirements on bulk carrier hull strength control for mariners. Some loading conditions that deemed safety according to traditional checking solution are dangerous after these requirements/ regulation taking effect. Many mariners in practice don't pay attention to the influence of these new requirements/ regulation. The influence of these requirements/ regulation on bulk carrier strength control and measures to be taken is studied mainly in this paper.

In this paper, from longitudinal strength aspect, IACS URS17 required the longitudinal strength is to be checked and to be adequate considering any one cargo hold flooding for single hull bulk carrier. The method for checking longitudinal strength considering any one cargo hold flooding according to S17 was studied, and based on it, simple method on checking residual strength considering ship hull damage was brought forward. From local strength aspect, the equation of approximately calculating maximum allowable cargo mass to ensure allowable local weight on the inner bottom plating was established considering density and repose angle of bulk cargo, and produced a convenient program to calculate maximum allowable cargo mass. According to design loading conditions for local strength requirements in S25, hold mass curves showing maximum allowable and minimum required mass in each hold and any two adjacent holds as a function of draught in sea-going condition as well as during loading and unloading in harbour are to be induced, a program that is suitable to a series of BC-A harmonized notation bulk carriers was made for calculating mass limitation in hold. Based on a series of dangerous loading condition that happens possibly or frequently by

ship strength calculating, the influence on strength control for bulk carrier was studied after new requirements taking effect, and the cause and characteristic of dangerous loading conditions are found ,then some advice and solution that are useful to strength control for operator/shipowner were put forward.

The purpose of this paper is to remind mariners controlling bulk carrier's hull strength in practice according to international requirements/regulation, and reduce the risk of bulk carrier. Some idea in paper comes from the accumulation of several years in author's navigational experience, which could be use for reference to some operators/shipowners in bulk carrier's hull strength controlling work.

Keywords: Bulk Carrer; Hull Strength; IACS URS

第 1 章 绪论

1.1 散货船运输的发展概况和形势

第二次世界大战结束后，由于全球对散货运输的大量需求以及散货运输特有的廉价和方便，散货船运输在海上货物运输中所占的地位日益重要，在货运总量中所占的比重也越来越大。干散货的种类主要有粮食、煤炭、矿石、化肥等。IMO 的调查显示，大宗散货运量近年来一直在持续增长，运输量占有海上货运总量的 33%，仅次于油轮运输。

随着世界干散货运输量的不断增长，散货船的船队规模也得到了较快的发展。1984 年共有 1 万 DWT 以上的散货船 4694 艘，总计 17810 万 DWT，1995 年增加到 4957 艘，总计 22870 万 DWT。截止到 2000 年 7 月，共有散货船 5426 艘，世界干散货船队的规模已达 2.719 亿载重吨^[1]。

随着散货船数量的增加，散货运输技术也不断发展，散货船的船型趋于标准化，即根据大小主要分为：Small-handy 型、Handy 型、Panamax 型和 Capesize 型。现代造船技术的不断发展，使得散货船在尺度上越来越大，载重量不断增加，不断趋向大型化。从早期的小吨位至六十年代的 20000 吨级到七十年代的 170000 吨级再至今天的 250000 吨级，而且还有继续增大的趋势^[2]。

随着散货船装载能力的提高，为了加快船舶周转，世界上各个国家加快了散货专用码头的建设，更新散货装卸设备，使得散货船装卸效率不断提高。各港口新建了许多新的深水码头，使港口接纳能力大大提高。码头装卸设备也越来越先进，高效率的连续式装船机，先进的抓斗式卸船机以及卸载粮食用的吸粮机的应用，大大提高了散货的装卸货速度，从而减少了船舶在码头停泊的时间，加快了船舶的周转。国际上有的港口装卸速度已达到了 16000 吨/小时。笔者在船任职期间，曾到过南非的 RICHARDS BAY 和美国的 NORFOLK，这两个港口装载煤炭的速度达到每装船机每小时 8500 吨。

船舶大型化后，很多港口水深无法满足船舶重载吃水的要求，经常出现先在某一水深较浅的港口装载到半载后再到水深较深的港口加载。另外由于船舶装载量较大，船上的货种可能不同，货主也可能不同。这样就出现了在几个港口装不

同的货物，到指定的几个不同的港口卸货的情况，这样就形成了在海上多种不同的装载状态。

1.2 散货船的装载方式和装运特点

1.2.1 散货船的装载方式

为满足空船时船舶吃水的需要，保证螺旋桨足够的沉深，常设计一至二个用来压载的货舱，如五个货舱船的第三舱，七个货舱船的第四舱等。为了保证操作上的灵活性，现代的散货船大多数在设计上满足装载不同种类货物，并适于多种装载方式。对于满载或接近满载工况常采用均匀装载方式或隔舱装载方式。

1. 均匀装载

对于装运煤炭、谷物等非重货物，常采用均匀装载方式，即将货物均匀分配到所有货舱来达到满载，如图 1-1。这种装载方式使船体整体和局部所受应力较小。



图 1.1 均匀装载图

Fig.1.1 Homogeneous load condition

2. 隔舱装载

对于装运重货（如铁矿石）经常采用隔舱装载方式，即一般大型散货船的第奇数舱装高密度货物而第偶数舱空舱，如图 1.2。这样装载的目的是提高船舶的重心，减小 GM 值，以降低船舶剧烈摇摆造成的危害。当高密度的货物间隔装载时，每个货舱的货物重量接近均匀装载情况下的两倍。这种装载方式常会在双层底结构产生过大的局部应力和在舱壁处产生过大的剪切应力。为承受舱内的较重载荷，设计时必须对货舱结构进行加强。可以采取隔舱装载方案的船舶必须经船级社批准，授予“重货加强”的附加标志，并指明在满载状态时，哪几个舱允许空舱。

(2) 部分装载

当船舶部分装载后需要到其他港口加载时，常选择某一个或几个货舱装载。这种装载方式通常不会在船舶装载手册中给出，营运中应特别引起注意。



图 1.2 隔舱装载图

Fig.1.2 Alternate load condition

1.2.2 散货船的装运特点

散货船在船体结构上通常在货舱区域设有用来装载压载水的双层底、左右舷对称的顶边水舱和底边水舱。货舱为单层甲板结构，造成舱底及舱壁所需承受的货物压力较大，在纵向强度及局部强度上都要求较高^[9]。所以散货船在运输中，为保证船体强度条件得到满足，必须合理分配货物在各舱的重量。

散货船的装卸与其它类型船舶的装卸有着明显的不同，大部分散货船不具有自装自卸能力，需要停靠专用的散货码头，依靠码头的装卸设备进行装卸。散货船的装卸速度也就取决于岸上装卸设备的装卸效率。一般来说装卸货速度较快，对于一艘 PANAMAX 型散货船完成从空载到满载，通常仅需十个小时左右。因此，散货船的装卸较容易出现安全问题和操作失误，要求装卸货物前合理安排装卸计划，装卸过程中要协调好港方和船方的关系，派专人看守以便按照装载计划进行装卸。

1.3 论文的选题背景

1.3.1 散货船事故及原因

散货船的安全问题起初并未受到应有的重视，但是近十几年来，散货船事故频频发生，至 2003 年 1 月 1 日，散货船灭失量已占到世界商船队总灭失量的 37%。严峻的散货船安全问题已经引起了各方面的广泛关注，日益成为国际海事界关注的焦点。在影响散货船安全的诸多因素中，船体强度因素处于主要地位。据伦敦保险商协会的统计，从 1990 年~1998 年 10 月，散货船的灭失数量总和为 104 艘。

当船舶部分装载后需要到其他港口加载时，常选择某一个或几个货舱装载。这种装载方式通常不会在船舶装载手册中给出，营运中应特别引起注意。

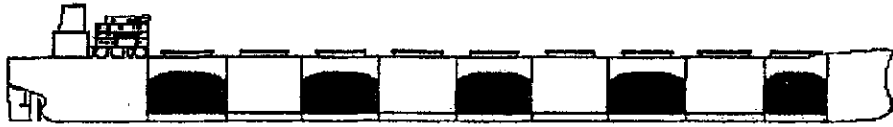


图 1.2 隔舱装载图

Fig.1.2 Alternate load condition

1.2.2 散货船的装运特点

散货船在船体结构上通常在货舱区域设有用来装载压载水的双层底、左右舷对称的顶边水舱和底边水舱。货舱为单层甲板结构，造成舱底及舱壁所需承受的货物压力较大，在纵向强度及局部强度上都要求较高^[3]。所以散货船在运输中，为保证船体强度条件得到满足，必须合理分配货物在各舱的重量。

散货船的装卸与其它类型船舶的装卸有着明显的不同，大部分散货船不具有自装自卸能力，需要停靠专用的散货码头，依靠码头的装卸设备进行装卸。散货船的装卸速度也就取决于岸上装卸设备的装卸效率。一般来说装卸货速度较快，对于一艘 PANAMAX 型散货船完成从空载到满载，通常仅需十个小时左右。因此，散货船的装卸较容易出现安全问题和操作失误，要求装卸货物前合理安排装卸货计划，装卸过程中要协调好港方和船方的关系，派专人看守以便按照装载计划进行装卸。

1.3 论文的选题背景

1.3.1 散货船事故及原因

散货船的安全问题起初并未受到应有的重视，但是近十几年来，散货船事故频频发生，至 2003 年 1 月 1 日，散货船灭失量已占到世界商船队总灭失量的 37%。严峻的散货船安全问题已经引起了各方面的广泛关注，日益成为国际海事界关注的焦点。在影响散货船安全的诸多因素中，船体强度因素处于主要地位。据伦敦保险商协会的统计，从 1990 年~1998 年 10 月，散货船的灭失数量总和为 104 艘。保险商协会的统计，从 1990 年~1998 年 10 月，散货船的灭失数量总和为 104 艘。

当船舶部分装载后需要到其他港口加载时，常选择某一个或几个货舱装载。这种装载方式通常不会在船舶装载手册中给出，营运中应特别引起注意。



图 1.2 隔舱装载图

Fig.1.2 Alternate load condition

1.2.2 散货船的装运特点

散货船在船体结构上通常在货舱区域设有用来装载压载水的双层底、左右舷对称的顶边水舱和底边水舱。货舱为单层甲板结构，造成舱底及舱壁所需承受的货物压力较大，在纵向强度及局部强度上都要求较高^[9]。所以散货船在运输中，为保证船体强度条件得到满足，必须合理分配货物在各舱的重量。

散货船的装卸与其它类型船舶的装卸有着明显的不同，大部分散货船不具有自装自卸能力，需要停靠专用的散货码头，依靠码头的装卸设备进行装卸。散货船的装卸速度也就取决于岸上装卸设备的装卸效率。一般来说装卸货速度较快，对于一艘 PANAMAX 型散货船完成从空载到满载，通常仅需十个小时左右。因此，散货船的装卸较容易出现安全问题和操作失误，要求装卸货物前合理安排装卸计划，装卸过程中要协调好港方和船方的关系，派专人看守以便按照装载计划进行装卸。

1.3 论文的选题背景

1.3.1 散货船事故及原因

散货船的安全问题起初并未受到应有的重视，但是近十几年来，散货船事故频频发生，至 2003 年 1 月 1 日，散货船灭失量已占到世界商船队总灭失量的 37%。严峻的散货船安全问题已经引起了各方面的广泛关注，日益成为国际海事界关注的焦点。在影响散货船安全的诸多因素中，船体强度因素处于主要地位。据伦敦保险商协会的统计，从 1990 年~1998 年 10 月，散货船的灭失数量总和为 104 艘。

其中，由于结构发生损坏的原因造成海难事故的船舶为 86 艘，占 82.69%。可以看出，大部分的散货船的事故是由于船体结构的损坏引起的。一般来说，造成船舶结构损坏的主要因素有以下几个方面：

1. 船体腐蚀与结构疲劳

随着船龄的增加，船舶不可避免要受到一些由日常操作、货物装卸、天气和海浪等的因素影响以及海水和货物对船体构件的腐蚀，从而使船体腐蚀和疲劳增加，船体强度减弱^[4]。因此，老龄散货船如果载运高密度的货物（如铁矿石），可能会出现船体结构应力超过许用值的情况，造成船体的损伤。船体结构的损伤主要表现在肋骨与船壳板、顶边水舱和底边水舱的连接处由于腐蚀和疲劳而裂开，如图 1.3，图 1.4，由于肋骨加强能力的减弱，舷侧抵御外力的能力减弱，所以很容易破损，造成海水进入货舱。



图 1.3 肘板趾部腐蚀
Fig.1.3 Corrosion of bracket toe

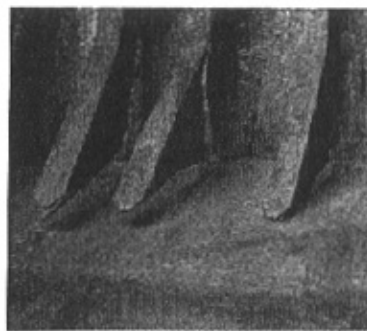


图 1.4 肘板趾部与底边舱及舷侧分离
Fig.1.4 Brackets detached from hopper plating

2. 船舶配积载不当

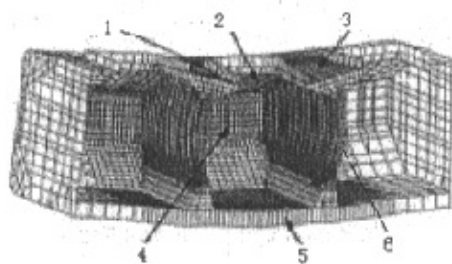
船体的总纵强度决定于船舶的重力和浮力纵向分布不一致时的程度，船体的局部强度决定于货物、油料、淡水和压载水的分布是否超过局部结构的承受能力。因而不恰当的货物配载或不恰当的压载水分布必然会造成局部剪力、弯矩比较大，甚至超过要求的最大限度，从而造成船体结构的破坏，危及船舶安全。配载不合理形成的严重的中拱或中垂，在涌浪作用下会产生强大的剪力和弯矩，进一步加剧船舶的危险性。

散货船在隔舱装载高密度货物时，重力和浮力沿纵向分布是很不一致的，会产生较大的总纵弯曲力矩，一般可以达到许用最大弯矩的 80%以上，同时在满载舱和空载舱之间的舱壁附近会产生相当大的剪力^[12]，甚至接近许用值。从实践来看，散货船发生船体破损事故，一般是隔舱装载重货并在恶劣海况条件下出现的。

3. 货物操作不当

装卸货时不恰当的装卸顺序和压载水排放顺序，也会严重影响船体强度。装卸过程中产生的局部剪应力和弯矩可能会达到甚至超过许用值，久而久之使船体结构变形和损坏，给船舶安全埋下隐患。另外，在货物装卸过程中，货物抓斗和大型铲车都有可能在作业时伤害船体结构。

如今各港口非常高的装卸效率，很容易造成每一货舱内的实际载货量与计划装载量出现较大差别。笔者在船任职期间，在加拿大的 PORT CARTIER 港装矿石时，曾询问过港方这个问题，他们承认每一货舱的实际装货量与计划装载量可能相差 10%~15%。单个货舱超载情况的出现，对整个船体和货舱段结构将会产生较大影响。特别是满载船舶采取隔舱装载方式时，一些货舱的装载量已达到或非常接近货舱的最大允许装载量，装载过程中出现的小量的误差就会出现货舱装载量超过该舱的最大允许装载量的危险状况。此时将会造成横舱壁、双层底板架结构及内外底板、船侧的肋骨及肘板、舱口隅角等结构应力过大甚至发生变形，如图 1.5，从而使船体结构遭受无法修复的损伤。



注：1) 舱口隅角变形 2) 顶边水舱变形 3) 货舱之间的连接带应力过大
4) 舷侧肋骨及肘板趾部应力过大 5) 双层底应力过大 6) 横舱壁变形

图 1.5 货舱内货物重量超过许用值时对船舶结构的影响

Fig.1.5 Effect on localized structure due to cargo overloading

再有，满载船舶采取隔舱装载方式时，船舶各横剖面所受的最大剪力和最大弯矩已接近许用值，装载过程中出现的小量的误差就会出现船舶横剖面所受到的剪力和弯矩超过许用值。下面是一艘 70000 载重吨的 PANAMAX 型散货船各货舱装载量与计划装载量出现少量误差后对船舶纵向受力的影响^[7]，如表 1.1。

表 1.1 某 70000 吨散货船货舱装载量出现误差对船舶纵向受力的影响

Tab.1.1 Sensitivity of the hull girder to cargo hold overloading-70 000 tonnes deadweight,
7 hold bulk carrier

装载状态	No. 1 舱载货 量(吨)	No. 3 舱载货 量(吨)	No. 5 舱载货 量(吨)	No. 7 舱载货 量(吨)	最大静水弯 矩(吨·米)	最大静水剪 力(吨)	首尾吃水 (米)
装载手册提供的 矿石装载方 案	15304	18128	18128	15823	144691 (98.1%)	49096 (97.5%)	13.41(A) 12.75(F)
5%货物由 No. 5 舱装入 No. 1 舱	16211	18128	17221	15823	174005 (119.2%)	-5495 (104.5%)	12.96(A) 13.20(F)
No. 5 舱 5%货 物装入 No. 1 舱、No. 7 舱	15785	18128	17221	16276	169075 (115.8%)	5391 (107.2%)	13.30(A) 12.86(F)
No. 5 舱 10%货 物装入 No. 1、 No. 7 舱	16211	18128	16314	16729	193559 (132.6%)	5877 (116.8%)	13.19(A) 12.98(F)

注：1) 各种装载状态总装货量不变；

2)%表示海上航行状态，最大静水弯矩（剪力）百分比。

4. 货物堆积不当

货物堆积不当造成船体结构的损伤，主要表现为：

1) 船上缺乏有效的装货监督，随意让装卸工人将高密度货物如铁矿石等堆积在大舱中间或偏向一侧，或装钢材及大件时垫舱不足等而造成局部结构变形。特别在有些港口，装卸工人为了贪图方便，不愿将货物均匀装入货舱各处，而是趁船员不注意将货物全部堆积在大舱中间或他们认为方便的舱位。

2) 有些港口的“习惯性”做法可能对船舶结构带来损坏。许多时候货物被堆积在货舱中间并非船员缺乏有效监督造成，而是由于港口当局常以“习惯性”做

法为由，拒绝船方的要求；或者有些租家认为以前租的船这样装过，那么你的船也应该可以接受这种装法；或者有的港口要求船方在安排装货作业顺序时，按港方“习惯性”做法进行，这些都将对船舶局部结构受力产生不利的影响。

5. 忽视船舶局部强度的审核^[5]

船舶强度的核准，包括船舶的纵强度和局部强度两方面。通过计算得出来的弯矩和剪力值在规定范围之内，仅仅满足船舶纵强度的要求。单一凭弯矩/剪力值来判断船舶强度是否符合要求是远远不够的，还应考虑局部强度是否符合要求。局部强度包括不同装载下的各货舱最大的装货允许设计负荷、单位面积的载荷要求、作为吃水函数的货舱载货量限额以及手册中列明的其它特殊要求。

谈起船舶的局部强度，很多租船人甚至航海人员本身考虑单位面积载荷方面较多，而常常忽视各货舱的允许设计负荷要求。尽管目前船上配载程序已经电脑化，然而由于缺乏有效设置，对各货舱允许设计负荷值缺乏有效的上限报警，很容易使大副在分配各舱货量时，忽视了该舱的货量是否满足不同装载下各货舱允许设计负荷的要求。装货后，尤其是装载休止角较大的重货，未进行充分平舱，造成局部货物过高，对舱底的负荷过大。特别是未考虑任一货舱及相邻货舱的载货量与吃水的函数关系，致使货舱内的实际载货量超过对应吃水时最大许用载货量或低于对应吃水时最小需要载货量，使货舱段所受载荷过大。

1.3.2 有关散货船安全的国际措施

散货船连续发生严重的海损事故，造成大量的财产损失和人员伤亡，引起了国际海事界的高度重视，尤其是国际海事组织（IMO）和国际船级社协会（IACS）采取了大量防范和补救措施，并发布了一系列针对散货船船体结构强度问题的新规则及要求。这些措施主要包括以下方面：

1. 提高结构强度及对强度控制的要求

1991年11月，IMO第17届大会通过的关于海安会（MSC）紧急行动的重要决议案之一是执行对散货船及其构造的完整性和腐蚀结果的检查和检验的详细技术要求。船级社和船东已被督促对所有营运中散货船的船体和过渡区域一带的壳板及其附件进行详细的检验。对特别检验壳板测厚和检验区域也提出了新要求，且在操作和装卸手册中应包括许用剪力和弯矩等要求^[6]。

IACS 也采取了一些措施, 诸如: 制定了对 1994 年 1 月起建造的新散货船的舷侧肋骨腹板最小厚度的统一要求和货舱结构的涂层保护的统一要求; 到 1998 年 7 月 1 日为止所有船长 150m 及以上的散货船必须配备装载仪的统一要求; 出版了“散货船船体结构检验、评估和维修指南”和“造船和修船质量标准”等以指导现场检验和维修工作。近十年来, IACS 为了适应新的国际海上人命安全公约的修订, 又公布了有关散货船的一系列新的强制性要求。IACS 关于散货船结构强度方面的统一要求 (Unified Requirements) 主要有^[7]:

- 1) UR S1 对装载工况、装载手册和装载仪的要求 (Requirements for Loading Conditions, Loading Manuals and Loading Instruments);
- 2) UR S1A 对装载工况、装载手册和装载仪的附加要求 (Additional Requirements for Loading Conditions, Loading Manuals and Loading Instruments for Bulk Carriers, Ore Carriers and Combination Carriers);
- 3) UR S12 单船壳散货船舷侧结构要求 (Side Structure in Single Skin Bulk Carriers);
- 4) UR S17 单船壳散货船考虑进水后的船体梁的总纵强度要求 (Longitudinal strength of hull girder in flooded condition for single side skin bulk carriers);
- 5) UR S18 对单船壳散货船考虑进水后的水密槽形横舱壁的要求 (Evaluation of scantlings of the transverse watertight corrugated bulkheads for single side skin bulk carriers during flooding);
- 6) UR S19 对现有单船壳散货船考虑进水后的水密槽形横舱壁的要求 (Evaluation of scantlings of the transverse watertight corrugated bulkhead between cargo holds Nos.1 and 2, with cargo hold No.1 flooded, for existing single side skin bulk carriers);
- 7) UR S20 考虑货舱进水时货舱允许装载量的要求 (Evaluation of allowable hold loading for single skin bulk carriers considering hold flooding);

- 8) UR S21 对散货船舱盖构件尺寸的要求 (Evaluation of scantlings of hatch covers of bulk carriers cargo hold);
- 9) UR S22 对现有单层船壳散货船考虑 No. 1 货舱进水时货舱允许装载量的确定要求 (Evaluation of allowable hold loading of cargo hold No. 1, with cargo hold No. 1 flooded, for existing single side skin bulk carriers);
- 10) UR S23 对现有单层船壳散货船关于 S19、S22 的补充要求 (Implementation of IACS Unified Requirements S19 and S22 for existing single side skin bulk carriers);
- 11) UR S25 散货船协调附加标志及其对应设计载荷工况的要求 (Harmonised notation and corresponding design loading conditions for bulk carriers);
- 12) S28 关于对散货船设置首楼的要求 (Requirements for the fitting of a forecastle for bulk carriers, ore carriers and combination carriers)。

2. ESP 及其实施^[6]

针对散货船事故频发现状,从九十年代起, IACS 各成员都加大了检验力度。挪威船级社 (DNV) 对易损区域做了界定,对这部分区域加大检验力度。IACS 在西方几个大船级社取得成功的基础上决定从 1993 年 7 月 1 日起,在 IACS 内部全面启动加强检验计划 ESP (Enhanced Survey Program)。这些措施收到了明显的效果,散货船失事率大幅下降,并在 IMO 第 18 届大会上被采纳为 A744(18)号决议,作为检验新规定纳入到 SOLAS 公约第 VI 章中予以强制执行。

3. 制定新的技术标准

在 1995 年 12 月召开的 IMO 第 19 届大会上通过了名为 A797(19)号决议,对港口国当局、船旗国主管机关、船东、船级社等有关方面提出了确保散货船安全的具体要求,规定 20000DWT 以上船龄 10 年以上的单舷侧散货船在完成 ESP 或按 ESP 要求完成所有货舱检验之前不允许装载高密度货物,对船东规定了 9 项安全措施。

1997 年 11 月召开的 1974 SOLAS 公约第四届缔约国大会上,IMO 通过了新的

安全条款，在现有的 SOLAS 公约第 XI 章之后增加了新的第 XII 章—散货船的附加安全措施，并于 1999 年 7 月 1 日生效。

2002 年 12 月在伦敦召开的 IMO 海上安全委员会第 76 次会议上 (MSC 76)，针对散货船的结构安全，对国际海上人命安全公约 (SOLAS 公约) 第 VII 章和 1988 年载重线议定书相关部分做出了修订。对散货船必须安装货舱进水系统做出了强制性规定。并决定开始着手制定一套完整的《散货船安全装卸操作规范》(“The Code of practice for safe Loading and Unloading of Bulk carrier” 简称 BLU Code) 以规范散货船的装卸操作。

此外，国际海事组织 (IMO) 在散货船安全方面的文件、决议有：

- IMO A. 713(17) 和 A. 797(19)：有关装载固体散货船舶安全；
- IMO A. 744(18)、A. 866(20)、MSC/Circ. 628、MSC/Circ. 655、MSC/Circ. 686 等加强散货船船舶检验的有关文件；
- IMO A. 862(20)、MSC/Circ. 690、MSC/Circ. 531、MSC/Circ. 666、MSC/Circ. 665、MSC/Circ. 611 等有关散货船货物安全装卸操作的文件；
- IMO MSC/Circ. 742 (海安会通函)：固体散货安全操作规则 (BC-Code) 修正案；
- IMO MSC/Circ. 667：散货船船上操作安全等。

1999 年召开的 MSC71 上正式决定将综合安全评估 (Formal Safety Assessment, FSA) 应用于散货船的安全方面的评估^[8]。近年来，英国一直在协调 FSA 再散货船安全领域的研究工作。FSA 是一种在工程技术与运行管理中用于制定合理的规则和提供风险控制综合性、结构化和系统性的分析方法。实施 FSA，可最终实现系统在运行效率、耗费时间和投资费用范围内达到最佳安全程度^[9]。近年来，世界上一些航运大国一直在协调 FSA 在散货船安全领域的研究工作。2001 年，日本应用 FSA 对散货船安全进行了评估并形成报告提交给了 IMO，在航运界和造船界产生了较大的影响。预计将来 IMO 将会采用 FSA 作为根本方法用以修订和支持规则，更改公约的内容，FSA 的实施将导致一个合理的规则制定方法，使公约规则基于风险的大小并且能够明显反映出利益，最终达到促进海上安全的目的。

4. 人为因素的控制

鉴于人为因素造成的事故达 70%之多，IMO 采取了一系列严格的控制手段。如重新修订了船员培训、发证和值班标准公约 (STCW95)，制定了国际船舶安全管理规则 (ISM Code)，并作为 SOLAS 公约第 IX 章，要求在 1998 年 7 月 1 日前完成所有散货船的认证工作，这标志着 IMO 的公约的制定进入了一个新的里程碑，即由一个纯粹以技术为主的公约变成把技术和人为因素综合为一体的公约。

此外，IMO 促进了全球性的港口国控制 PSC (Port State Control) 体系的形成。现已建立了以下几个港口国控制组织：巴黎备忘录、东京备忘录 (环太平洋)、加勒比海备忘录 (美洲)、地中海备忘录等。其中澳大利亚、加拿大和美国政府对港口国控制工作的不断加强，使得这一旨在控制低标准船安全的全球性网络日渐严格及成熟。严密的港口国监控有利于散货船严格遵守新的国际规范标准，保障了散货船的安全。

IACS 在这方面也做了一些卓有成效的工作。1992 年 IACS 实施质量体系认证计划 (QSCS)，对 IACS 的各成员进行质量体系认证。1994 年重新制定了完全符合 ISO9001 系列的 IACS 质量体系要求，每年一次年度审核，三年一次中间审核。目的在于首先从内部规范船级社的行为，控制服务质量。

1.3.3 航运中散货船强度控制存在的问题

为了更好的了解营运中散货船结构强度控制存在的问题，笔者于 2004 年 7 月至 2005 年 8 月在巴拿马籍 PANAMAX 型散货船上任职十三个月，在此期间，笔者发现航海人员在工作中对散货船结构强度控制存在如下问题：

1. 忽视考虑货舱进水状态下的总纵强度审核

现有散货船根据 SOLAS 公约第 VII/11 条规定，均安装了装载仪。URS17 要求校核考虑任一货舱进水状态下的船舶总纵强度，并要求总纵强度处在允许范围内。但在营运中，航海人员通常只校核完整状态时的剪力和弯矩，忽视考虑货舱进水状态下的总纵强度审核，很多装载仪根本不具有校核考虑货舱进水状态下总纵强度的功能，一些较新船舶的装载仪虽然有此项功能，但航海人员根本不知道应该使用或如何使用；

2. 忽视船舶局部强度的控制

剪力和弯矩值在规定范围之内，仅仅表明满足船舶纵强度的要求，单凭剪力

和弯矩值来判断船舶强度是否符合要求是远远不够的，还应考虑局部强度的要求。局部强度包括不同装载状态下的各货舱最大的装货允许设计负荷、单位面积的载荷要求，以及手册中列明的其它特殊要求。IACS UR S1A 和 S25 中又提出了利用货舱吃水与货舱最大允许载货量/最小需要载货量的函数关系校核局部强度的要求。在生产实践中，一般航海人员忽视了装载的高密度货物上表面不平整时舱底单位面积允许载荷的要求，特别是 IACS UR S25 生效后，很多航海人员更是忽视了利用货舱吃水与货舱载货量限制的函数关系校核局部强度。很多装载仪根本不具有利用货舱载货量限制与货舱吃水的函数关系校核局部强度的功能，一些较新船舶的装载仪虽然有此项功能，但很多航海人员根本不知道应该使用和如何使用。

1.4 论文研究的目的及主要内容

1.4.1 论文研究的目的

从散货船的安全现状可以看出，目前散货船存在一个共同的问题，即船舶结构强度问题，对于散货船，航海人员主要关注的问题是总纵强度和局部强度。如何才能把营运中的风险降至最低，提高散货船营运的安全系数，保证人、船、货的安全，延长船舶的使用寿命，这有赖于在散货船营运中加强对船舶强度的控制，特别应当注意的是 IACS 统一要求中有关散货船结构强度的要求生效以后，对营运中散货船强度控制提出的新的要求，增加的新校核内容。在诸多国际新规则中，国际船级社协会统一要求 S17 和 S25 引起了航运界的普遍关注。本文通过研究 UR S17 中对单船壳散货船考虑货舱进水后的船体梁总纵强度要求和 UR S25 散货船协调附加标志及其对应设计载荷工况中增加的有关局部强度要求，旨在能让航海人员熟悉新规则对散货船强度控制带来的影响，在实践中能遵照国际新规则进行散货船强度控制，减小营运中存在的风险，为散货船的安全营运服务。

1.4.2 论文研究的主要内容

本文结合笔者在航海实践中发现的容易被忽视的散货船强度控制问题，对散货船的总纵强度和局部强度的校核方法和控制方案展开研究。重点研究受航运界普遍关注的 IACS URS17 和 S25 提出的新要求对营运中散货船的强度控制产生的巨大影响及航运中需要采取的强度控制方案。为此，笔者在本文中完成以下工作：

1. 在总纵强度方面，在传统的总纵强度控制基础上，根据 IACS UR S17 有关单船壳散货船考虑任一货舱进水后的船体梁的总纵强度的要求，研究考虑任一货舱进水后船舶总纵强度的校核方法，并在此基础上，提出航海人员方便应用的计算船舶破损后剩余强度的方法；

2. 在局部强度方面，研究当装载高密度货物时，为保证货舱内底板均布载荷的限制要求，考虑货物休止角后的货舱最大装货量近似计算方法并编制方便航海人员使用的计算程序；

3. 根据 IACS UR S25 散货船协调附加标志及其对应设计载荷工况中增加的局部强度的校核要求，研究每一货舱及相邻两货舱的货物重量限额与吃水的函数关系曲线的确定方法和该曲线在实践中的应用方法。编制适用 BC-A 协调标志散货船确定每一货舱及相邻两货舱装载量极限的计算程序；

4. 结合航运中散货船可能或经常发生的危险工况，阐述国际新要求的实施给营运中散货船强度控制带来的影响，找出危险工况的特点及发生的原因，并提出了航运界人士在进行散货船强度控制时应注意的问题及应对方案。同时，文中一些关于对散货船强度控制的观点来源于笔者多年航海实践经验的积累，可以供航运界有关人士在实践中参考和借鉴。

第 2 章 散货船的总纵强度控制

2.1 船舶总纵强度的基本计算及校核方法

2.1.1 静水中船体的纵向弯曲

一艘船漂浮在静止的水中，对整个船舶而言，重力和浮力是相互平衡的，但仔细分析重力和浮力沿着船长方向的分布时，却发现重力和浮力并非处处都均衡。设想把船体分割成若干段，因每个段上重力和浮力不平衡，必定产生彼此间的上下错动，一直到取得静力平衡为止。事实上船体是一个整体性构造的结构，各段之间的上下移动必然受到限制，任一段的移动会牵动其它各段移动，结果使船体发生纵向弯曲变形，并在船体结构内部产生内力。船舶抵抗船体沿船长方向产生剪切及弯曲变形的能力称为船体纵向强度 (Longitudinal Strength)。

2.1.2 剪力和弯矩

重力在纵向上沿船长的分布为重力分布曲线 (weight curve)，用 $p(x)$ 表示。整船的重力分布曲线是由空船重量分布曲线和载重分布曲线迭加而成，一般并不均匀 (见图 2.1a)。浮力在纵向上沿船长的分布构成浮力分布曲线 (buoyancy curve)，用 $b(x)$ 表示，浮力分布与吃水、吃水差及船中的拱垂情况等因素有关，中间较均匀，首尾则显著减小至 0 (见图 2.1b) ^{[13][14]}。

单位长度上的载荷大小就是单位长度上的重力与浮力的差值，即 $q(x) = p(x) - b(x)$ 。因此重力分布曲线与浮力分布曲线之差即为载荷曲线 (load curve) (见图 2.1c)。

作用在船体各横剖面上的剪力 (shear force) 可表示为：

$$N(x) = \int q(x) dx \quad (t) \quad (2.1)$$

即载荷曲线的一次积分曲线为剪力曲线 (shear curve) (见图 2.1d)。

作用在船体各横剖面上的弯矩 (bending moment) 可表示为：

$$M(x) = \int N(x) dx = \int \int q(x) dx dx \quad (t \cdot m) \quad (2.2)$$

即载荷曲线的二次积分曲线为弯矩曲线 (bending moment curve) (见图 2.1e)。

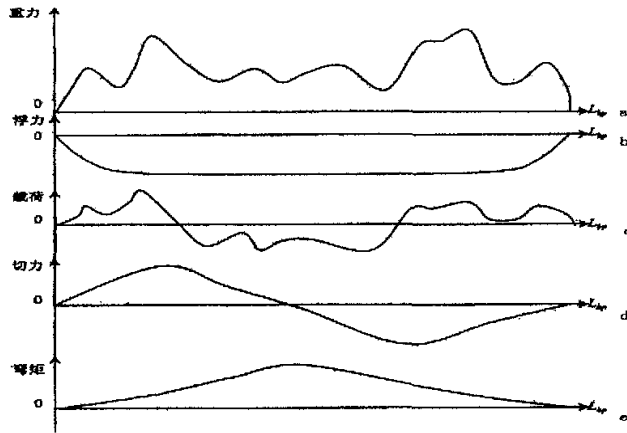


图 2.1 剪力、弯矩示意图

Fig.2.1 Curves of shear force and bending moment

船舶的剪力和弯矩是检验船舶纵向强度是否符合要求的两个重要指标。

2.1.3 波浪弯矩和波浪剪力的计算

船舶处于波浪中，要受到由波浪产生的附加浮力（相对于静水状态的浮力增量），若波浪浮力分布曲线为 $\Delta b(x)$ ，则船体各剖面处的波浪剪力和波浪弯矩理论上可表示为

$$\text{波浪剪力: } N_w(x) = \int_0^x \Delta b(x) dx \quad t \quad (2.3)$$

$$\text{波浪弯矩: } M_w(x) = \int_0^x N_w(x) dx = \int_0^x \int_0^x \Delta b(x) dx dx \quad t \cdot m \quad (2.4)$$

由于波浪形状的复杂性，很难确定波浪浮力分布，所以国际上各船级社在相关理论分析和大量统计资料基础上多给出了波浪剪力和波浪弯矩的简化计算公式，各船级社给出的公式在形式虽然不同，但内容和结果是基本一致的。这里仅介绍中国船级社（CCS）2002 版《钢质海船入级与建造规范》（以下简称《钢规》）给出的简化计算公式^[16]，本文各例波浪剪力和波浪弯矩结果都是采用该公式计算的。

船体梁各剖面的中拱波浪弯矩 $M_w(+)$ 和中垂波浪弯矩 $M_w(-)$ 计算公式为：

$$\begin{cases} M_w(+) = +190MCL^2 BC_b \times 10^{-3} & \text{KN} \cdot \text{m} \\ M_w(-) = -110MCL^2 B(C_b + 0.7) \times 10^{-3} & \text{KN} \cdot \text{m} \end{cases} \quad (2.5)$$

式中，M—弯矩分布系数如图 2.2，也可按下式计算：

$$M = 2.5 \cdot \frac{x}{L} \quad , \quad \text{当 } \frac{x}{L} \leq 0.4 \text{ 时；}$$

$$M=1, \quad \text{当 } 0.4 < \frac{x}{L} \leq 0.65 \text{ 时；}$$

$$M = \frac{1 - \frac{x}{L}}{0.35} \quad \text{当 } 0.65 < \frac{x}{L} \leq 1.0 \text{。}$$

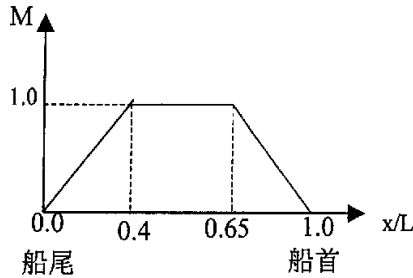


图 2.2 波浪弯矩分布系数 M

Fig.2.2 Distribution factor of bending moment-M

C_b —方形系数，取值不得小于 0.6；

L—船长，m；

B—船宽，m；

C—系数，按下列各式计算：

$$C = 0.0412L + 4 \quad \text{当 } L < 90\text{m 时；}$$

$$C = 10.75 - \left(\frac{300 - L}{100} \right)^{3/2} \quad \text{当 } 90 \leq L \leq 300 \text{ 时；}$$

$$C = 10.75 \quad \text{当 } 300 \leq \frac{x}{L} \leq 350 \text{ 时。}$$

船体梁各横剖面的中拱波浪剪力 $N_w(+)$ 和中垂波浪剪力 $N_w(-)$ 计算公式为：

$$\begin{cases} N_w(+) = +30F_1CLB(C_b + 0.7) \times 10^{-2} & \text{KN} \\ N_w(-) = -30F_2CLB(C_b + 0.7) \times 10^{-2} & \text{KN} \end{cases} \quad (2.6)$$

式中，C、 C_b 、L、B 与 2.5 式相同；

F_1 和 F_2 —剪力分布系数，如图 2.3, 2.4。

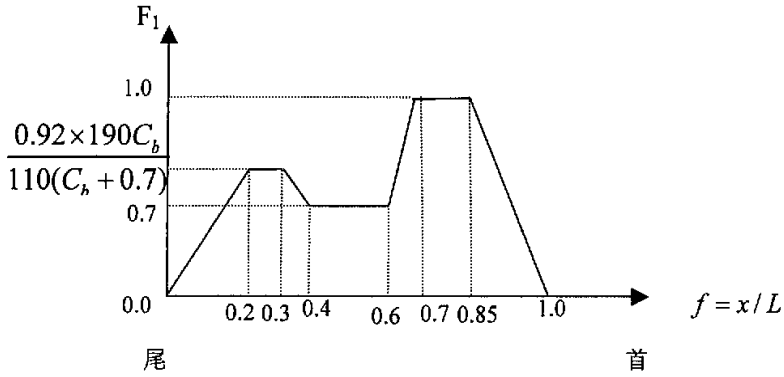


图 2.3 剪力分布系数 F_1

Fig.2.3 Shear force distribution factor - F_1

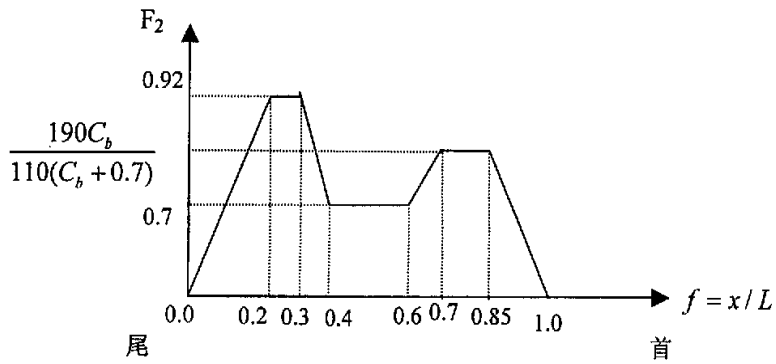


图 2.4 剪力分布系数 F_2

Fig.2.4 Shear force distribution factor - F_2

2.1.4 船舶总纵合成弯矩及合成剪力的计算

作用在船体梁各横剖面的实际剪力即为静水剪力与波浪剪力之和，实际弯矩即为静水弯矩与波浪弯矩之和，其计算公式为：

$$\begin{cases} N(x) = N_s(x) + N_w(x) & \text{kN} \\ M(x) = M_s(x) + M_w(x) & \text{kN} \cdot \text{m} \end{cases} \quad (2.7)$$

2.1.5 隔舱装载时的剪力修正

在某一装载状态下，如有空舱，由于双层底结构在纵向上的直接载荷传递作用⁽⁴¹⁾，在横舱壁处应对习惯计算方法得到的剪力曲线进行修正。CCS《钢规》规定，如果间隔装载或严重不均匀装载，应对横舱壁处的静水剪力进行修正，剪力修正如图 2.5 所示，剪力修正值 N_k 和 N_m 分别按下列各式计算：

$$\begin{cases} N_k = F |F_{sA} - F_{sB}| & \text{kN} \\ N_m = F |F_{sA} - F_{sC}| & \text{kN} \end{cases} \quad (2.8)$$

式中， F_{sA} 、 F_{sB} 、 F_{sC} —分别是横舱壁 A、B 和 C 处用船体梁所得剪力，kN；

F—静水剪力修正系数，按下式计算：

$$F = \frac{B_0}{2.2(B + l_H)}$$

式中： B_0 —计算舱段内双层底平坦部分平均宽度，m；

B—船宽，m；

l_H —舱长，m。

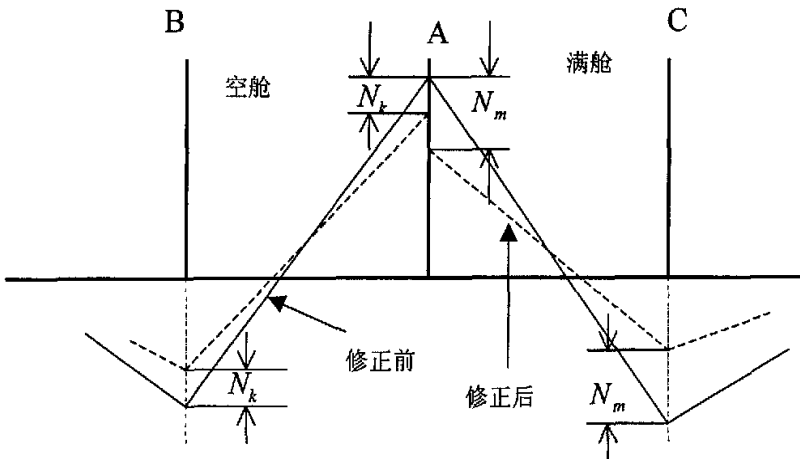


图 2.5 剪力修正示意图

Fig.2.5 The correction of shear force

2.1.6 船体剖面要素的计算

1. 剖面中和轴的确定⁽¹⁴⁾

剖面中和轴是指船体梁在弯曲过程中各个剖面转动的轴线，该轴线通过剖面的形心并与剖面基线平行。根据材料力学的知识，中和轴距剖面基线的高度 Z_n 为：

$$Z_n = \frac{\int_F Z dF}{F} \quad (2.9)$$

式中， F —剖面面积，由各个构件的截面实面积组成， m^2 ；

Z —积分微面积中心距基线高度， m 。

2. 剖面对中和轴的静距

在确定了剖面的中和轴位置后，剖面的静距计算以中和轴作为计算轴线。显然整个剖面对于中和轴的静距为 0。实际需要的是计算距离中和轴距离 h 范围内的剖面面积对中和轴的面积静距 S ，则有

$$S = \int Z dF \quad (2.10)$$

3. 剖面对中和轴的惯性矩

剖面对中和轴的惯性矩 I 可表示为

$$I = \int Z^2 dF \quad (2.11)$$

4. 船体剖面模数的求取

确定船舶横剖面中和轴以及剖面静距和惯性矩的计算通常列表计算。首先将船舶结构图抽象简化，并且在图上对剖面构件进行编号。在编号过程中将到参考轴距离相等的同类构件编相同的号，对于不承担纵向弯矩的构件可略去。在轴线以上的构件形心到参考轴的距离为正，反之为负。构件的剖面积与形心位置可从构件的尺寸样图取得。对于高度较大的垂向构件，需考虑自身的惯性矩。例如对于方形板，惯性矩为：

$$i_0 = 1/12 A_i h_i^3 \quad (2.12)$$

式中， h_i —构件的垂直高度， m ；

A_i —构件的面积， m^2 。

5. 剖面模数的确定

根据梁的弯曲理论，船体梁的总纵弯曲应力为：

$$\sigma = \frac{M}{I} Z \quad (2.13)$$

式中 M 为计算剖面的总纵弯矩。

在船体强度计算中将上式通常写成

$$\sigma = \pm \frac{M}{W} \quad (2.14)$$

式中 $W = I/|Z|$ ，称为船体剖面模数。剖面模数是表征船体结构抵抗弯曲变形能力的一种几何特征值。

对于船体横剖面，从中和轴到船体甲板的距离 Z_d 和到船底板的距离 Z_b 不相等。甲板剖面模数和船底剖面模数分别表示为：

$$\begin{cases} W_d = \frac{I}{Z_d} \\ W_b = \frac{I}{Z_b} \end{cases} \quad (2.15)$$

2.1.7 船体剖面许用合成剪力和许用合成弯矩的计算

对于一艘建造好的船舶，船体各个横剖面模数已经确定，所以各个剖面的许用剪力和许用弯矩也已经确定。

根据《钢规》给出的公式，船体许用合成弯矩，按下列两式计算，取较小者：

$$\begin{cases} \bar{M} = F_d W_d [\sigma] \times 10^{-3} \quad \text{kN} \cdot \text{m} \\ \bar{M} = F_b W_b [\sigma] \times 10^{-3} \quad \text{kN} \cdot \text{m} \end{cases} \quad (2.16)$$

式中， F_d ， F_b —局部构件尺寸的折减系数，确定方法参见《钢规》第二篇；

$[\sigma]$ —许用弯曲应力， N/mm^2 。

对于散货船，船体许用合成剪力，可按下列两式计算：

$$\begin{cases} [N] = [\tau] \frac{I \cdot t_s}{0.5 \cdot S} \times 10^{-2} \quad \text{kN} & \text{中拱状态} \\ [N] = -[\tau] \frac{I \cdot t_s}{0.5 \cdot S} \times 10^{-2} \quad \text{kN} & \text{中垂状态} \end{cases} \quad (2.17)$$

式中, $[\tau]$ —许用剪切应力, N/mm^2 ;

t_s —中和轴处舷侧外板厚度, mm 。

2.1.8 船体各剖面剪力和弯矩的校核

在实践中, 对于完整船舶, 通常通过检查船舶各剖面处的静水剪力和静水弯矩看是否处于允许范围来校核船体的总纵强度。

许用静水剪力应按下列式计算:

$$\begin{cases} \bar{F}_s(+)= [N]-N_w(+), & \text{kN} \\ \bar{F}_s(-)= -[N]-N_w(-), & \text{kN} \end{cases} \quad (2.18)$$

许用静水弯矩应按下列式计算:

$$\begin{cases} \bar{M}_s(+)= [M]-M_w(+), & \text{kN} \cdot \text{m} \\ \bar{M}_s(-)= -[M]-M_w(-), & \text{kN} \cdot \text{m} \end{cases} \quad (2.19)$$

港内一般取海上波浪载荷的 50% 计算, 所以港内许用静水剪力和许用静水弯矩分别比海上的许用值要大。

可见, 提高波浪剪力和弯矩的估计值将使实际使用的许用剪力和许用弯矩变得更小, 即更加严格, 从而对保证船舶在海上的安全提供更有力的保障。

静水剪力实际值占许用值的百分比为静水剪力百分比; 静水弯矩实际值占许用值的百分比为静水弯矩百分比。在航运实践中, 通常用最大静水剪力百分比和最大静水弯矩百分比来描述船舶的总纵强度是否处于允许范围。

2.2 按 IACS UR S17 考虑货舱进水后的总纵强度计算

IACS UR S17 要求 1998 年 1 月 1 日以后建造的单壳散货船, 当任一货舱进水后的纵向强度满足要求。对于船长在 150 米及以上, 装载密度为 1.0 及以上的固体散货的单壳散货船, 在实践中, 不但要校核船舶完整状态时的总纵强度, 而且要校核考虑任一货舱进水后的总纵强度。只有二者均满足要求, 才能认为该装载状态的总纵强度满足要求。考虑货舱进水的总纵强度计算一般分三步: 首先确定进水货舱的渗透率, 然后确定最终平衡水线, 最后按规则校核总纵强度。

2.2.1 渗透率的确定

实际进水体积与理论进水体积之比称为舱的渗透率。不同种类货物的渗透率不同。根据 IACS URS17 规定：对于空货舱，渗透率取 0.95；对于装载固体散货的货舱，将货舱分为货物以上空间和货物所占空间，货物以上空间的渗透率取 0.95，货物所占空间的渗透率根据货物来确定；对包装货物渗透率取 0。在航运实践中，散装货物所占空间的渗透率通常取 0.3，本文各例中的渗透率均是按照散装货物所占空间取 0.3、货物以上空间取 0.95 计算的。

2.2.2 散货船货舱进水后最终水线的确定

散货船货舱进水后最终水线的确定通常采用的方法是重量增加法或过量进水法。这里仅介绍实践中航海人员常使用的方法：重量增加法。其基本思路是将进水视为船舶载重增加，由于增加载重的重心不一定在船舶的漂心上，所以船舶除下沉外还会发生纵倾和横倾，形成新的水线面；新的水线面可能高于进水位置，则该处的进水量将增加，于是又形成新的水线面，依次类推，经过一段时间后，舱内水面与舷外水面一致，进水量不再发生变化^[9]。其基本计算步骤如下：

1. 确定初始浮态及货舱进水位置

如某轮货舱进水前的初始水线为 WL，如图 2.6，首、尾吃水及平均吃水分别为： d_F 、 d_A 、 d_m ， x_f 为漂心坐标，进水货舱的重心纵向坐标 x_{p1} 可近似取为舱容中心的纵坐标，由舱容表查取。这里采用原点在船中的首向坐标系。

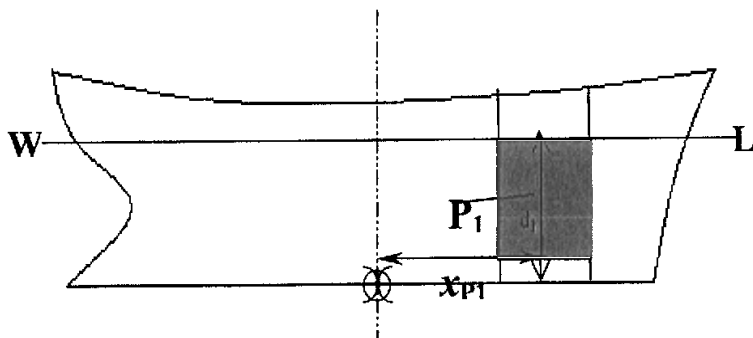


图 2.6 船舶初始浮态及货舱进水位置示意图

Fig.2.6 The location of cargo hold flooding

2. 第一次货舱进水近似计算

令进水货舱舱容中心至漂心距离为 $x_h = x_{p1} - x_f$ (m), 进水货舱舱长中间处吃水 d_h 由图 2.7 可知:

$$d_h = d_{\odot} + \frac{t \cdot x_h}{L_{BP}} = \frac{d_F + d_A}{2} + \frac{t \cdot x_h}{L_{BP}} \quad \text{m} \quad (2.20)$$

式中: d_{\odot} —船中处吃水, m。

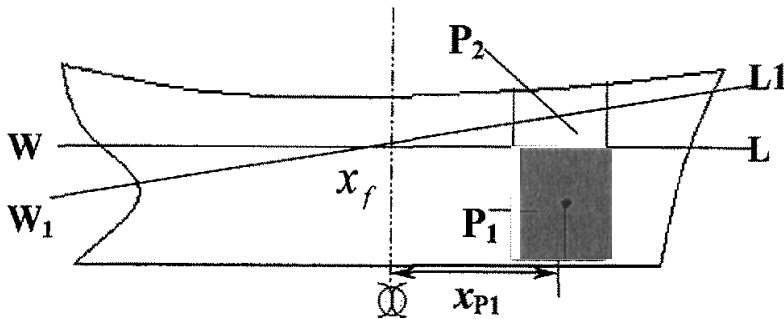


图 2.7 船舶第一次进水后浮态
Fig.2.7 The conditon after hold flooded firstly

由 d_h 从舱容表中查出相应的理论进水体积 v_{h1} , 即对应的散装容积, 由式 2.21 可算得进水量 P_1 , μ 为渗透率, 注意货物所占空间和货物表面以上空间渗透率应分别选取。

$$P_1 = \mu \cdot \rho \cdot v_{h1} \quad \text{t} \quad (2.21)$$

其中, ρ 为海水密度。

P_1 按少量加载处理, 则有吃水差改变量 δt_1 为:

$$\delta t_1 = \frac{P_1 \cdot (x_{p1} - x_f)}{100 \cdot MTC} \quad \text{m} \quad (2.22)$$

首、尾吃水改变量分别为:

$$\begin{cases} \delta d_F = \frac{P_1}{100 \cdot TPC} + \frac{L_{BP}/2 - x_f}{L_{BP}} \cdot \delta t \\ \delta d_A = \frac{P_1}{100 \cdot TPC} - \frac{L_{BP}/2 + x_f}{L_{BP}} \cdot \delta t \end{cases} \quad m \quad (2.23)$$

考虑货舱第一次进水后的首、尾吃水分别为：

$$\begin{cases} d_{F1} = d_F + \delta d_F \\ d_{A1} = d_A + \delta d_A \end{cases} \quad m \quad (2.24)$$

这样即确定出货舱第一次进水后的近似水线 W_1L_1 。

3) 第二次货舱进水近似计算

由于水线由 WL 变为 W_1L_1 ，则货舱第一次进水后舱中处吃水 d_{h1} 变为：

$$d_{h1} = d_h + \delta d_{h1} = d_h + \frac{P_1}{100TPC} + \frac{\delta t_1 \cdot x_h}{L_{BP}}$$

由 d_{h1} 从舱容表中查出相应的理论进水体积 v_{h2} ，可计算第二次进水量 P_2 为：

$$P_2 = \mu\rho(v_{h2} - v_{h1})$$

依照第一次进水的计算方法，可以确定第二次近似水线为：

$$\begin{cases} d_{F2} = d_{F1} + \delta d_{F2} \\ d_{A2} = d_{A1} + \delta d_{A2} \end{cases}$$

依次类推，进行第三次、第四次……近似计算。当某一次进水量不大于 $5\%P_1$ 时，可认为满足近似计算精度的要求，该计算即为最后一次计算；或新的平均吃水与前一次的差值小于 1cm 时，也可认为该次计算水线即为最终平衡水线 W_nL_n 。

2.2.3 考虑货舱进水后的总纵强度校核方法

根据 IACS UR S17 规定，考虑货舱进水后校核总纵强度时，认为船体梁是完整的，所以船舶各剖面的许用合成剪力和许用合成弯矩与完整状态时相比是不变的。波浪载荷取完整状态时海上波浪载荷的 80% ，故此时许用静水剪力和许用静水弯矩较完整时要大。

1. 考虑货舱进水后的静水弯矩的校核方法

1) 静水弯矩许用值按下式计算

$$\begin{cases} \overline{M}_s(+)=\overline{M}-0.8M_w(+), \\ \overline{M}_s(-)=-\overline{M}-0.8M_w(-) \end{cases} \quad (2.25)$$

式中许用合成弯矩 \overline{M} 按(2.16)计算,中拱波浪弯矩 $M_w(+)$ 和中垂波浪弯矩 $M_w(-)$ 按(2.5)公式确定。

2) 计算考虑各货舱分别进水情况下的船舶各剖面实际静水弯矩值。

3) 分别考虑各货舱进水,将计算出的静水弯矩实际值与许用值进行比较,若任一货舱进水后,静水弯矩实际值小于许用值,则表明满足 IACS UR S17 要求;反之,若有任何一货舱进水后的静水弯矩超出许用值,则表明该装载工况不满足 IACS UR S17 要求,亦即不满足总纵强度要求。

2. 考虑货舱进水后的静水剪力的校核方法

1) 静水剪力许用值按下式计算

$$\begin{cases} \overline{N}_s(+)=[\tau] \cdot \frac{I \cdot t_s}{0.5 \cdot S} \cdot 10^{-2} - 0.8N_w(+), & \text{kN} \\ \overline{N}_s(-)=-[\tau] \cdot \frac{I \cdot t_s}{0.5 \cdot S} \cdot 10^{-2} - 0.8N_w(-), & \text{kN} \end{cases} \quad (2.26)$$

式中: N_w —波浪剪力, kN; 按(2.6)公式计算;

$[\tau]$ —许用剪切应力, 110Mpa。

2) 计算考虑各货舱分别进水情况下的各剖面实际静水剪力。

3) 分别考虑各货舱进水,将计算出的静水剪力实际值与许用值进行比较,若任一货舱进水后,静水剪力实际值小于许用值,则满足 IACS UR S17 要求;反之,则不满足 IACS UR S17 要求,亦即不满足总纵强度要求。。

2.3 考虑船体破损时的船体纵向强度

2.2 节内容是考虑货舱进水但认为船体梁是完整状态时的总纵强度的校核。但在海上船体货舱进水一般都是由船体破损造成的,如碰撞、搁浅造成船体舷侧或船底破损。当船舶发生事故后船体破损,这时对航海人员来说就应该了解本船船体的总纵强度是否还满足要求,船体是否处于危险状态,做到心中有数,以便尽

快做出决断。

2.3.1 剩余强度

广义的结构裕度包括结构的储备强度和剩余强度两个方面。结构的储备强度指设计载荷与结构可承受的极限载荷之间的裕度。结构的剩余强度则是结构系统在一个或一个以上构件因腐蚀、疲劳、碰撞等原因受损伤或失效后结构能继续承受载荷而不发生破坏的能力。显然结构裕度的两个方面是密切联系的。两者反应了结构系统在不同状态下的承载能力。储备强度反应结构在完整状态下的超载能力；剩余强度反映结构在个别或某些构件损伤或失效后的承载能力^[22]。结构剩余强度的衡准主要使用两种方法：基于剖面模数的剩余强度衡准和基于极限强度的剩余强度衡准^[8]。本文只介绍便于航运界操作的基于剖面模数的剩余强度衡准。

2.3.2 船体梁极值弯矩

船舶遭遇碰撞或者搁浅时，船舶速度以较低的速度航行，同时，在允许的情况下，避开海况恶劣的海区，根据波浪理论，船舶的波浪弯矩是与船舶的航行速度和波浪的有义波高密切相联系的，可以推断此时相应的波浪弯矩应该比原来小。根据各船级社规定，当进行船舶总载荷计算时，需进行最大静水弯矩和波浪诱导弯矩的修正，ABS SAFEHULL SYSTEM 给出的受损船体梁弯矩估算公式^[8]为：

$$M_t = k_{us} \cdot M_s + k_{uw} \cdot M_w \quad (2.27)$$

式中， M_s —完整船体极值静水弯矩（中垂/中拱）；

M_w —完整船体波浪诱导极值弯矩（中垂/中拱）；

K_{us}, K_{uw} —修正系数，取值按表 2.1。

表 2.1 载荷修正系数

Tab.2.1 Correction factor of still water and wave load

		搁浅	碰撞
中拱	K_{us}	1.1	1.0
	K_{uw}	0.5	0.7
中垂	K_{us}	0.9	1.0
	K_{uw}	0.5	0.7

其中，完整船体极值静水弯矩 M_s 和波浪弯矩 M_w 可采用 IACS 提供的公式计算。

完整船体极值静水弯矩为：

$$\begin{cases} M_s(+)=+150CL^2B(8.167-C_b)\times 10^{-3} & \text{KN}\cdot\text{m} \\ M_s(-)=-65CL^2B(C_b+0.7)\times 10^{-3} & \text{KN}\cdot\text{m} \end{cases} \quad (2.28)$$

式中， $C=10.75-\left(\frac{300-L}{100}\right)^{3/2}$ 当 $90\leq L\leq 300$ 时。

完整船体极值波浪弯矩为：

$$\begin{cases} M_w(+)=+190CL^2BC_b\times 10^{-3} & \text{KN}\cdot\text{m} \\ M_w(-)=-110CL^2B(C_b+0.7)\times 10^{-3} & \text{KN}\cdot\text{m} \end{cases} \quad (2.29)$$

式中，C 值与式 2.28 中 C 取法相同。

2.3.3 基于剖面模数的剩余强度衡准

对于完整船体，其设计载荷都小于其可承受的极限载荷，而破损船体的剩余强度则是船体在某些构件或局部舱室结构破损后能继续承受外载荷的能力。根据美国船级社的规定，基于横剖面模数的剩余强度衡准^{[10][22]}可定义为：

$$f_r = \frac{SM}{SM_r} \quad (2.30)$$

式中，SM—破损船体剩余剖面模数；

SM_r —ABS 规定中要求的剖面模数， $SM_r = 0.9M_s/\sigma_p$ ；

f_s —安全系数，若 $f_s \geq 1$ ，满足破损船体剩余强度要求；反之，不满足破损船体剩余强度要求。

对于船舶的甲板和船底板要求的剖面模数可分别使用如下公式求得：

$$\begin{cases} SM_r = 0.9M_{st}/\sigma_p & \text{中垂} \\ SM_r = 0.9M_{sb}/\sigma_p & \text{中拱} \end{cases} \quad (2.31)$$

其中， M_{sb} —受损船体梁中拱弯矩，由式 2.27 计算；

M_{is} —受损船体梁中垂弯矩，由式 2.27 计算；

σ_p —表示材料许用弯曲应力， N/mm^2 ， $\sigma_p=175/Q$ 。

Q 的取值如下：低碳钢取 1.0；H32 高强度钢取 0.78；

H36 高强度钢取 0.72；H40 高强度钢取 0.68。

2.3.4 破损船体剖面模数的计算

在船舶碰撞或搁浅使船体发生损坏时，破损处的船体横剖面的剖面模数减小，该剖面处抵御应力的能力降低，因此需要对破损处的船体横剖面的剖面模数有所了解，才能正确判断船舶破损后的强度。如按传统方法来计算破损船体剖面模数，所需时间很长，也不便于航海人员进行操作。因而，有必要根据破损的情况，寻找一种简单的船舶破损模型，对破损后的船舶剖面模数进行估算，确定出破损情况下船舶的强度。这里介绍一种简化直接计算方法^[20]，航海人员可以在船舶破损事故发生时及时方便地评价船舶的总纵强度。

1. 破损横剖面的表示

1) 散货船破损横剖面的表示

由于在船舶横剖面中，对纵向弯曲起作用的主要构件基本相同，包括上甲板、舷侧板、船舶底板、舷侧纵骨、船底纵骨、船底龙骨及桁材等。根据其几何特性，给出一个剖面的基本形状(如图 2.8)。其中阴影部分表示由于碰撞或搁浅所引起的损坏区域。

图中各个参数代表含义：

Z_0 —完整状态下中和轴距基线高度，m；

Z_1 —完整状态下甲板距中和轴距离，m；

B—船舶宽度，m；

D—船舶型深，m。

2) 剖面破损程度的定义

对于营运的船舶，破损位置和范围具有随机性。每一事故，需要很多的参数才能详细描述船体的损伤，但并不是所有参数都对计算船舶强度有用。因此，根据实际损坏情况，本文保留了损坏的主要特征。

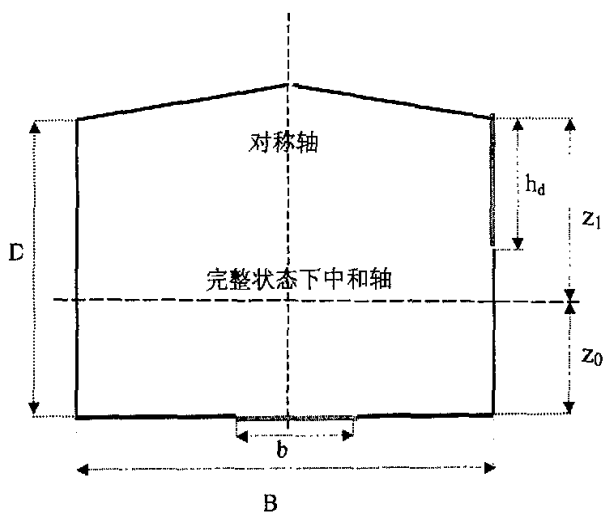


图 2.8 破损船体横剖面图
Fig.2.8 A transverse section of a damaged ship

对于搁浅损伤，主要是船底板损失，假设船舶外底板和相连的外底纵骨损坏，桁材保持完整。这样可以使船舶破损宽度与船舶宽度的比值来对船体的损坏程度进行描述。

对于碰撞损伤，假设舷侧外板和相连的纵骨损坏，破损范围由甲板边缘开始并向下延伸。连接着破损边缘的甲板纵桁和纵向舱壁保持完整。此时，使用船舶舷侧外板损坏高度与船舶横剖面高度的比值来描述船舶破损程度。

这种假设简化破损的定义，只使用一个参数就可以描述出破坏的程度。

2. 破损船体剖面模数计算公式的推导^{[20][21]}

根据前面所述，假设船舶的破损处已知，则船舶横剖面中和轴垂向移动的距离 δz_0 为：

$$\delta z_0 = -\frac{cr}{1-r} \quad (2.32)$$

其中， $r = \frac{\delta A}{A}$ ；

δA —损坏结构区域面积；

c —结构损坏区域面积距初始中和轴距离；

A —完整状态下剖面面积;

由于中和轴位置是向远离破损的位置移动, 则此时船舶剖面的惯性矩变为:

$$I' = I + A\delta z_0^2 - \delta A(c - \delta z_0)^2 \quad (2.33)$$

式中, I —完整状态下惯性矩。

将式 2.32 代入式 2.33 中, 可得

$$I' = I - Ac^2 \frac{r}{1-r} \quad (2.34)$$

则中和轴之上 z 处的剖面模数 SM' 为:

$$SM' = \frac{I'}{z - \delta z_0} \quad (2.35)$$

SM' 与完整状态时的剖面模数 SM 相比, 可得:

$$\frac{SM'}{SM} = \frac{1 - (Ac^2 / I)(r / (1-r))}{1 + (c / z)(r / (1-r))} \quad (2.36)$$

将上式展开并忽略高次项, 式 2.36 转换为与船舶尺度无关的表达式:

$$\frac{SM'}{SM} = 1 - \left(\frac{Ac^2}{I} + \frac{c}{z}\right)r - \left(\frac{Ac^2}{I} + \frac{c}{z}\right)\left(1 - \frac{c}{z}\right)r^2 - \left(\frac{Ac^2}{I} + \frac{c}{z}\right)\left(1 - \frac{c}{z}\right)^2 r^3 \quad (2.37)$$

同理, 可推出, 中和轴之下 z 处剖面模数的表达式如下:

$$\frac{SM'}{SM} = 1 - \left(\frac{Ac^2}{I} - \frac{c}{z}\right)r - \left(\frac{Ac^2}{I} - \frac{c}{z}\right)\left(1 + \frac{c}{z}\right)r^2 - \left(\frac{Ac^2}{I} - \frac{c}{z}\right)\left(1 + \frac{c}{z}\right)^2 r^3 \quad (2.38)$$

式 2.37、2.38 二式即为船舶破损时剖面模数与完整状态时剖面模数之比的一般表达式。

1. 搁浅损伤时剖面模数的计算

船舶搁浅损伤时, 设其破坏宽度为 b , 由于搁浅的位置位于船底基线, 式中 $c = -z_0$, 在式 2.37 中, $z = z_1$, 据图 2.8 有: $z_0 + z_1 = D$, 可将式 2.37 整理为:

$$\frac{SM'_d}{SM_d} = 1 - \left(\frac{Az_0^2}{I} - \frac{z_0}{z_1}\right)r - \left(\frac{Az_0^2}{I} - \frac{z_0}{z_1}\right)\frac{D}{z_1}r^2 - \left(\frac{Az_0^2}{I} - \frac{z_0}{z_1}\right)\left(\frac{D}{z_1}\right)^2 r^3 \quad (2.39)$$

式中, SM'_d —破损状态下甲板剖面模数;

SM_d —完整状态下甲板剖面模数。

在式 2.38 中用 z_0 代替 z , c 用 $-z_0$ 替换, 则可得

$$\frac{SM_b'}{SM_b} = 1 - \left(\frac{Az_0^2}{I} + 1 \right) r \quad (2.40)$$

式中, SM_b' —破损状态下舱底板剖面模数;

SM_b —完整状态下舱底板剖面模数。

$\delta A / A$ 可以分解为两部分: 在破损横剖面内, $\delta A / A_b$ 代表损坏区域面积与船底结构面积的比值; A_b / A 表示船底板结构面积与船舶剖面结构面积的比值。通常情况下, 在一给定横剖面内, 船底板与底板纵向结构的尺寸是一致的。所以, 可以近似认为破损区域的宽度与船宽之比 b/B 与 $\delta A / A_b$ 是成正比的, 则可得到以下关系:

$$\frac{\delta A}{A} \approx \left(\frac{b}{B} \right) \left(\frac{A_b}{A} \right) \quad (2.41)$$

将式 2.41 代入式 2.39, 则可以得到搁浅船舶破损前后甲板的剖面模数比为:

$$\frac{SM_d'}{SM_d} = 1 - \alpha_1 \left(\frac{b}{B} \right) - \alpha_2 \left(\frac{b}{B} \right)^2 - \alpha_3 \left(\frac{b}{B} \right)^3 \quad (2.42)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 = \frac{A_b}{A} \left(\frac{Az_0^2}{I} - \frac{z_0}{z_1} \right) \\ \alpha_2 = \left(\frac{A_b}{A} \right)^2 \left(\frac{Az_0^2}{I} - \frac{z_0}{z_1} \right) \frac{D}{z_1} \\ \alpha_3 = \left(\frac{A_b}{A} \right)^3 \left(\frac{Az_0^2}{I} - \frac{z_0}{z_1} \right) \left(\frac{D}{z_1} \right)^2 \end{array} \right. \quad (2.43)$$

将式 2.41 代入式 2.40, 可得搁浅船舶破损前后船底板的剖面模数比为:

$$\frac{SM_b'}{SM_b} = 1 - \alpha_1 \left(\frac{b}{B} \right) \quad (2.44)$$

$$\text{其中, } \alpha_1 = \frac{A_b}{A} \left(\frac{Az_0^2}{I} + 1 \right) \quad (2.45)$$

2. 碰撞损伤时剖面模数的计算

碰撞损坏始于甲板边板，损坏包括边板和舷侧纵骨而不包括甲板和与损坏区域相连的纵向舱壁。现假设碰撞损坏区面积为 δA ，其高度为 h_d ， A_s/A 表示舷侧结构面积与船舶剖面结构面积的比值， c 为损坏区域中心至中和轴的距离，可表示为：

$$c \approx z_1 - 0.5h_d \quad (2.46)$$

与式 2.41 类似，可以近似得

$$\frac{\delta A}{A} \approx \left(\frac{h_d}{D}\right)\left(\frac{A_s}{A}\right) \quad (2.47)$$

将式 2.46、2.47 式代入式 2.37 中，则可得碰撞损伤时船舶破损前后甲板剖面模数比的表达式：

$$\frac{SM_d'}{SM_d} = 1 - \alpha_1\left(\frac{h_d}{D}\right) - \alpha_2\left(\frac{h_d}{D}\right)^2 - \alpha_3\left(\frac{h_d}{D}\right)^3 \quad (2.48)$$

此时：

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{A_s}{A} \left(\frac{AZ_1^2}{I} + 1 \right) \\ \alpha_2 = -\frac{A_s}{A} \left(\frac{AZ_1^2}{I} + 0.5 \right) \frac{D}{z_1} \\ \alpha_3 = \frac{A_s}{A} \frac{AD^2}{4I} + \left(\frac{A_s}{A} \right)^2 \left(\frac{AZ_1^2}{I} + 1 \right) \left(0.5 \frac{D}{z_1} \right) \end{cases} \quad (2.49)$$

将式 2.46、2.47 代入式 2.34 中，可得破损前后船底剖面模数比为：

$$\frac{SM_b'}{SM_b} = 1 - \alpha_1\left(\frac{h_d}{D}\right) - \alpha_2\left(\frac{h_d}{D}\right)^2 - \alpha_3\left(\frac{h_d}{D}\right)^3 \quad (2.50)$$

其中，

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{A_s}{A} \left(\frac{AZ_1^2}{I} - \frac{z_1}{z_0} \right) \\ \alpha_2 = -\frac{A_s}{A} \left(\frac{AZ_1 D}{I} - 0.5 \frac{D}{z_0} \right) + \left(\frac{A_s}{A} \right)^2 \left(\frac{AZ_1^2}{I} - \frac{z_1}{z_0} \right) \frac{D}{z_0} \\ \alpha_3 = \frac{A_s}{A} \frac{AD^2}{4I} - \left(\frac{A_s}{A} \right)^2 \left(\frac{AZ_1(D+0.5z_1)}{I} - \frac{z_1}{z_0} - 0.5 \right) \frac{D}{z_0} \\ \quad + \left(\frac{A_s}{A} \right)^3 \left(\frac{AZ_1^2}{I} - \frac{z_1}{z_0} \right) \frac{D}{z_0} \end{cases} \quad (2.51)$$

在上述的推导中，忽略了损坏区域对自身的惯性矩 i_0 的影响。

当船舶搁浅时，船底损坏区域自身惯性矩的大小，正比于自身的面积和自身厚度的平方。板块的厚度与中和轴到船底的距离相比，是一个非常小的值，所以，自身惯性矩是一个可以忽略的值。因此，在船舶搁浅时，忽略损坏区域惯性矩的影响。

对于碰撞船舶， i_0 是一个关于 δA 和 h_d 的函数， δA 沿垂直方向的损坏为 h_d 。此时， i_0 不可忽略。假设 δA 作为一个规则的方形，垂向为 h_d ，横向为 t ，所以自身惯性矩为：

$$i_0 \approx \frac{th_d^3}{12} \approx \frac{\delta A h_d^2}{12} \quad (2.52)$$

可见，对于每个结构自身惯性矩，取决于其面积大小和距中和轴距离的平方。破损后剖面总惯性矩应扣除破损结构自身惯性矩的影响，所以式 2.34 可写成

$$I' = I - Ac^2 \left(\frac{r}{1-r} \right) - \frac{\delta A h_d^2}{12} \quad (2.53)$$

考虑 i_0 ，通过重新推导，发现 α_1 、 α_2 保持不变， α_3 则需要根据情况进行调整，

对于碰撞损伤时，甲板剖面模数的求取， α_3 变为

$$\alpha_3 = \frac{A_s}{A} \frac{AD^2}{3I} + \left(\frac{A_s}{A} \right)^2 \left(\frac{Az_1^2}{I} + 1 \right) \left(0.5 \frac{D}{z_1} \right) \quad (2.54)$$

对于碰撞损伤时船底剖面模数的求取， α_3 变为：

$$\begin{aligned} \alpha_3 = & \frac{A_s}{A} \frac{AD^2}{3I} - \left(\frac{A_s}{A} \right)^2 \left(\frac{Az_1(D+0.5z_1)}{I} - \frac{z_1}{z_0} - 0.5 \right) \frac{D}{z_0} \\ & + \left(\frac{A_s}{A} \right)^3 \left(\frac{Az_1^2}{I} - \frac{z_1}{z_0} \right) \frac{D}{z_0} \end{aligned} \quad (2.55)$$

所以，当考虑损坏区域对自身的惯性矩 i_0 的影响时，式 2.48、2.50 中的 α_3 应分别用式 2.54、2.55 代替。

3. 散货船破损后剩余剖面模数的简化方程^[21]

ABS 船级社的 GE WANG 先生曾对 18 艘不同尺度的散货船使用上述方法作了剩余剖面模数计算, 发现上述简化公式中的系数与船舶主尺度无关^[21], 并应用概率理论给出了预报散货船破损后剩余剖面模数的简化方程。

1) 搁浅损伤

搁浅损伤时, 甲板剖面模数和底板剖面模数随船舶底板的损失关系表示如下:

$$\text{船舶底板: } \frac{SM_b'}{SM_b} = 1 - 0.421 \times \left(\frac{b}{B}\right) \quad (2.56)$$

$$\text{甲板: } \frac{SM_d'}{SM_d} = 1 - 0.069 \times \left(\frac{b}{B}\right) - 0.024 \times \left(\frac{b}{B}\right)^2 - 0.009 \times \left(\frac{b}{B}\right)^3 \quad (2.57)$$

根据式 2.56、2.57 可以绘制当散货船搁浅时, 甲板剖面模数和船底板剖面模数随船舶底板的损失关系曲线, 如图 2.9。

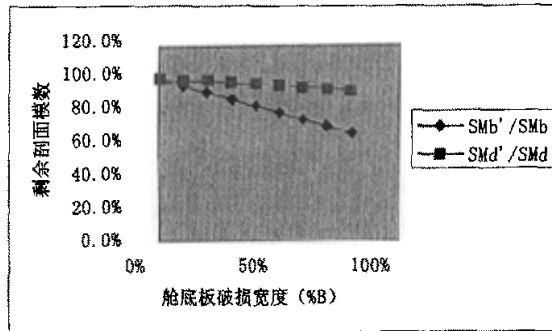


图 2.9 船底板破损时剩余剖面模数

Fig.2.9 Residual section modulus with bottom damage

由图 2.9 可以发现, 搁浅损伤时, 船底板剖面模数的减小速度远大于船舶甲板剖面模数的减小速度。

2) 碰撞损伤

船舶舷侧外板损失与甲板剖面模数、船底剖面模数的关系如下:

$$\text{甲板: } \frac{SM_d'}{SM_d} = 1 - 0.328 \times \left(\frac{h_d}{D}\right) + 0.468 \times \left(\frac{h_d}{D}\right)^2 - 0.244 \times \left(\frac{h_d}{D}\right)^3 \quad (2.58)$$

$$\text{船底板: } \frac{SM'_b}{SM_b} = 1 - 0.072 \times \left(\frac{h_d}{D}\right) + 0.231 \times \left(\frac{h_d}{D}\right)^2 - 0.142 \times \left(\frac{h_d}{D}\right)^3 \quad (2.59)$$

根据式 2.58、2.59 可以绘制当散货船碰撞时，甲板剖面模数和底板剖面模数随船舶底板的损失关系曲线，如图 2.10。

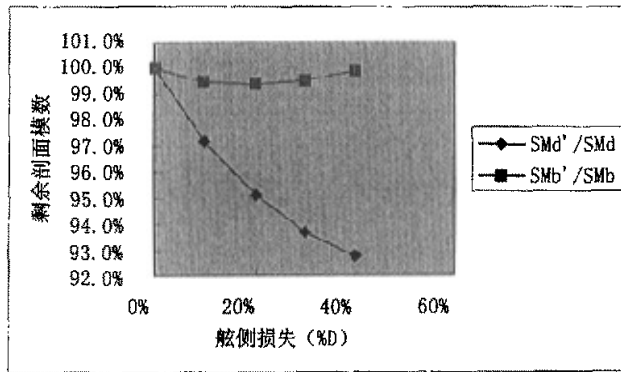


图 2.10 舷侧破损时剩余剖面模数

Fig.2.10 Residual section modulus with side damage

根据图 2.10 可以发现：碰撞损伤时，舷侧外板损失对甲板的剖面模数影响较大，对船底剖面模数的影响是比较小的。

从式 2.56、2.57、2.58、2.59 可知，对于某一艘散货船来说，只要确定出船底板沿船宽方向破损宽度或舷侧破损沿船深方向的长度，就可以近似了解船舶破损横剖面的剩余剖面模数。

2.5 散货船总纵强度校核实例

应用本章以上研究的内容，以一艘 HANDY SIZE 型散货船“JINLI”轮为例介绍散货船总纵强度校核的方法与步骤。

1. 船舶装载状态及浮态

由于本例目的在于阐述散货船总纵强度校核的方法与步骤，故选取了船舶装载手册中提供的满载出港时的隔舱装载工况，船上装载密度为 2.11 的矿石，油舱装至舱容的 95%，淡水舱装满，各舱配货重量如表 2.2。

表 2.2 各舱配货重量

Tab.2.2 Cargo weight distribution in each hold

舱别	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
配货重量 (吨)	13549	0	20500	0	14446

此时, 船舶吃水达到了夏季满载水线, 排水量为 58962t, 首吃水为 11.64m, 尾吃水为 12.18m。

2. 总纵强度校核

1) 完整状态时总纵强度校核

根据本章 2.1 节知识, 计算船舶在海上各横剖面的实际静水剪力和静水弯矩, 由于本例采取了隔舱装载方案, 计算剪力时需要进行剪力修正。然后与许用值进行比较。校核结果如图 2.11。其中, 最大剪力百分比发生在 207 肋位处, 该剖面的实际静水剪力为 -4209t (负号表示中垂), 许用静水剪力为 -5449t, 最大剪力百分比为 77.2%; 静水弯矩最大百分比发生在 157 肋位处, 实际静水弯矩为 89742 t·m, 许用静水弯矩为 108253 t·m, 最大弯矩百分比为 82.9%。由此可知该装载工况满足完整状态时的总纵强度要求。

2) 考虑货舱进水后时总纵强度校核

这里仅以 No. 3 货舱进水为例阐述考虑货舱进水时总纵强度校核方法。货物所占空间的渗透率取 0.3, 货物以上空间渗透率取 0.95。No. 3 货舱总舱容为 13310 m³, 货物所占舱容为 9712 m³, 应用本章 2.2.2 节知识, 可确定船舶达到最终平衡水线时首吃水为 12.36m, 尾吃水为 12.53m, 进水量为 2884t。应用 2.2.3 知识, 校核总纵强度得到, 最大静水剪力百分比发生在 135 肋位处, 该剖面的实际静水剪力为 -4819 t (负号表示中垂), 许用静水剪力为 -6220 t, 最大剪力百分比为 77.4%; 最大静水弯矩百分比发生在 161 肋位处, 实际静水弯矩为 70194 t·m, 许用静水弯矩为 129270 t·m, 最大弯矩百分比为 54.3%。由此可知该装载工况满足 No. 3 舱进水的总纵强度要求。

依次类推, 校核其它货舱进水后的总纵强度均满足要求。

所以该装载工况满足考虑货舱进水时总纵强度要求。

基于以上对完整状态和考虑货舱进水时总纵强度的校核，可以判定该装载工况满足总纵强度的要求，即满足 IACS UR S17 要求。

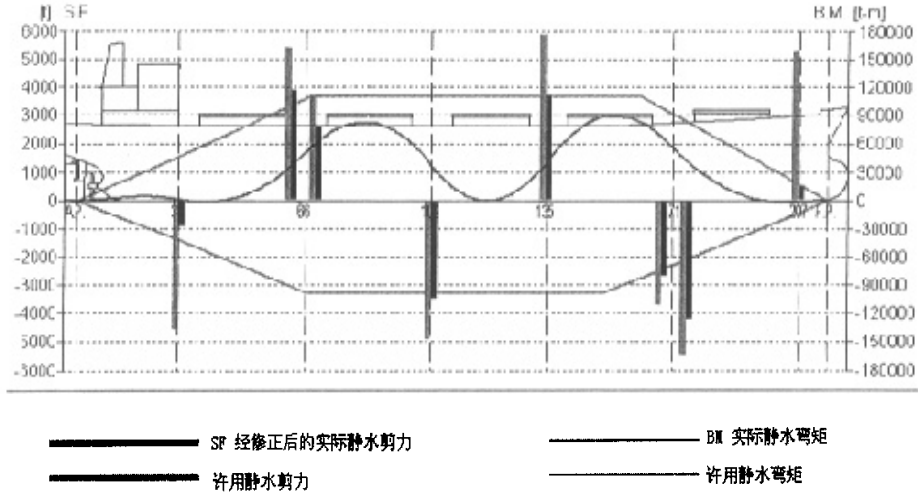


图 2.11 完整状态时总纵强度校核曲线

Fig.2.11 Curves for longitudinal strength checking in intact condition

3) 考虑船体破损时剩余强度的校核

若考虑船舶是由于 No.3 货舱舷侧舱长中点位置破损，破口垂向长度与型深之比 $b/D=0.2$ 。基于剩余强度的概念，对于破损剖面，应用式 2.3.32、2.3.33 可以确定剩余剖面模数，对于船底板为 99.4%，对于甲板为 95.1%。在根据 ABS 规范进行校核，对于船底板，安全系数 $f_b=2.53$ ，对于甲板，安全系数 $f_s=2.23$ ，船舶剩余强度满足 ABS 规范要求。

第3章 散货船的局部强度控制

3.1 散货船局部强度定义

船舶在重力和浮力的作用下，除了使各横剖面上出现剪力和弯矩从而使船体发生总纵弯曲变形和剪切变形外，还将在局部范围内对船体的结构产生压力，使这些结构发生局部变形，即局部结构的弯曲变形或剪切变形。这种变形超过一定限度，会造成结构损坏。若受损的局部结构属于参加抵抗总纵弯曲的构件，则还会使局部损坏范围内的横剖面上抵抗总纵剪切和弯曲的有效构件数量减少，即受损构件不能有效地传递总纵弯曲应力，从而使船体总纵强度下降。为此，要求船体各部分结构在外力作用下具有抵抗局部变形和损坏的能力，船体所具有的这种能力称为局部强度^[10]。对于散货船，局部强度包括不同装载状态下的各货舱最大的装货允许设计负荷、单位面积的载荷要求，以及手册中列明的其它特殊要求。IACS UR S25中又提出了利用货舱吃水与货舱最大允许载货量/最小需要载货量的函数关系校核局部强度的要求。

散货船装载固体散货时，局部强度往往不被大多数航海人员所重视，他们认为总纵强度满足要求，局部强度就没问题，这种观点是错误的。主要表现在以下几个方面：

1. 纵向强度和局部强度概念是完全不同的，从外力引起结构变形和损坏的观点来看，外力的作用可分为总体性的和局部性的。总体性损坏会危及船舶的安全，当它蔓延到一定区域后会使船舶断裂、沉没。至于局部性损坏，由于涉及的面较小，一般短期不会危及整艘船舶的安全，但局部性损坏累积到一定程度，同样会危及整船的安全，也是应该避免的。

2. 在装载较高密度固体散货（如矿石）时，大部分情况下要采取隔舱装载方式，货舱内货物重量大，如未进行平舱或平舱不充分，货物表面并不是平面，在最高点所对应的舱底处的负荷量很容易超过许用值；

3. 双层底上的计算载荷是用货物压力和舱底的水压力之差表示的，当吃水较小而舱内货物重量较大时或吃水较大而舱内货物较少时会造成舱底所承受的负荷过大，使舱底的局部结构受损。

3.2 散货船货舱的均布载荷

3.2.1 均布载荷定义及表示方法

局部强度涉及到的外载荷可分为两种类型,一种为均布载荷,表示单位面积上承载的重量,标准单位为 kPa,航运上习惯使用单位为 t/m^2 ;另一种称为集中载荷,表示为一特定面积(通常为某一较小的接触面积)上承载的重量,标准单位为 KN,航运上习惯使用单位为 t。

固体散货对舱底的压力被视为均布载荷。绝大多数散货船装载手册中列出了每一货舱的内底板最大许用局部载荷 p_d (t/m^2) 和货舱的最大许用装载量 M_{max} (t),供航海人员在实践中使用。表 3.1 和表 3.2 为中远集团的“XX 海”轮每一货舱的最大许用局部载荷 p_d (t/m^2) 和最大许用装载量 M_{max} (t)。

表 3.1 各货舱内底的单位面积允许的最大重量

Tab. 3.1 Maximum allowable local weight on inner bottom plate in each hold

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9
ON TANK TOP (t/m^2)	39.57	22.50	39.57	22.50	39.57	22.50	39.57	22.50	39.57

表 3.2 各货舱最大允许装货重量

Tab. 3.2 Maximum allowable cargo mass in each cargo hold

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9
Max. Cargo Mass (t)	29300	19900	37250	19750	38200	23258	37300	21500	30100

在航运实践中,任何情况下,货舱货物产生的均布载荷 p 不超过该舱的最大许用局部载荷,每一货舱的装货量 M 不超过该舱的最大许用装载量 M_{max} ,可表示为:

$$\begin{cases} p \leq p_d \\ M \leq M_{max} \end{cases} \quad (3.1)$$

3.2.2 固体散货对舱底产生的均布载荷计算

对于固体散货对舱底的压力可以看作均布载荷。如某一货舱装货重量为 $W(t)$,

货舱的底面积为 $A(\text{m}^2)$, 并假定货物上表面是理想平整的, 则舱底实际负荷量为:

$$p = \frac{W}{A} \quad \text{t/m}^2 \quad (3.2)$$

但事实上, 由于货物有休止角, 平舱也不一定充分, 所以货物表面并不一定平整, 这造成了货物在舱内高度出现较大差别, 那么装载高度越大的位置对舱底产生的载荷也越大, 特别是高密度固体散货如铁矿石, 危险局面更容易出现, 从而造成货舱内底板局部结构受损。

设舱内某一位置货物装载高度为 $H_i(\text{m})$, 货物的积载因数为 $SF(\text{m}^3/\text{t})$, 则该位置所对应的舱底处的均布载荷^[9]为:

$$p = \frac{H_i}{SF} \quad \text{t/m}^2 \quad (3.3)$$

货物的最高点所对应的最大堆装高度不应超过下式计算的值,

$$H_{\max} = p_d \cdot SF \quad \text{m} \quad (3.4)$$

式中, p_d —最大许用局部载荷 p_d , t/m^2 。

对于装载固体散货, 上式也可写成

$$H_{\max} = \frac{p_d}{\rho_c} \quad \text{m} \quad (3.5)$$

其中, ρ_c —固体散货的密度, t/m^3 。

如果货舱经充分平舱后, 散货上表面是平整的, 装货体积可达到舱高为 H_{\max} 所对应的舱容 $V_c(\text{m}^3)$, 此时理论上最大装货量 $P_{\max} = \rho_c \cdot V_c(\text{t})$ 与装载手册中提供的最大许用装货量 M_{\max} 中的较小者, 但在实践中需要根据货物的性质留出足够的安全余量, 所以固体散货的最大量是要小于根据 $P_{\max} = \rho_c \cdot V_c$ 所确定的值。

3.2.3 考虑固体散货休止角时货舱最大允许装货量的确定

大部分固体散货(如谷物、矿石、煤炭、水泥等)都具有散落性, 货物散落性的大小用货物的休止角来表示。休止角是指散货由空中缓慢自然散落到平面上所形成的锥形体与水平面的夹角。不同种类的货物, 休止角不同。为保证散货船舱底内板的均布载荷不超过许用值, 应注意固体散货休止角的影响。

为了计算考虑固体散货休止角时货舱内货物最大装载量, 笔者建立如下货物顶面横向形状模型, 如图 3.1, 假定舱内货物沿船长方向是均匀分布的, 忽略顶边水舱和底边水舱的影响, 认为货物最大高度位于货舱中纵剖面处, 货物的休止角为 δ , 最大高度不能超过 $H_{\max} = \frac{P_d}{\rho_c}$ 所确定的值。

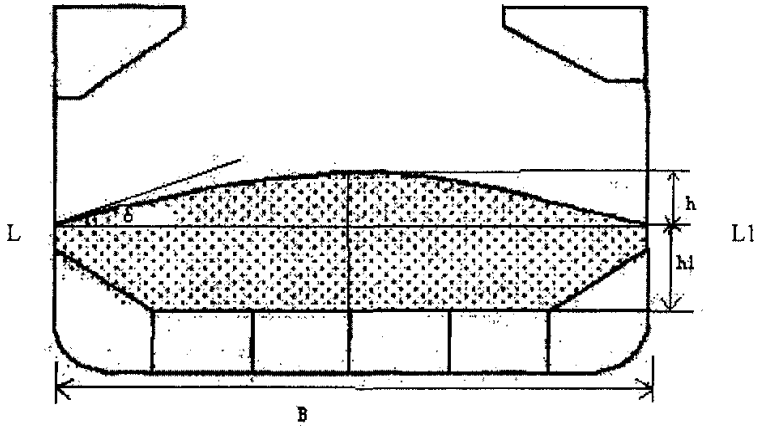


图 3.1 货物顶面横向形状

Fig.3.1 Shape of cargo top surface

货物顶面至水平连线 LL1 的最大距离为:

$$h = \frac{B}{2} \tan \frac{\delta}{2} \quad \text{m}; \quad (3.6)$$

式中, B—船宽, m。

假定货物顶面沿横向为抛物线, 该顶面方程为:

$$z = h \times \left(1 - \frac{y^2}{\left(\frac{B}{2}\right)^2}\right) \quad \text{m} \quad (3.7)$$

式中, y—沿船宽方向的横坐标, m;

z—货物顶面至水平连线 LL1 的距离, m。

抛物线和水平连线 LL1 之间所围部分的面积 A 为:

$$A = 2 \int_0^{\frac{B}{2}} z dy = 2 \int_0^{\frac{B}{2}} h \times \left(1 - \frac{y^2}{\left(\frac{B}{2}\right)^2}\right) dy = \frac{2}{3} \cdot B \cdot h \quad \text{m}^2 \quad (3.8)$$

则抛物线至水平连线 LL1 的货物重量 P_1 可确定为: $P_1 = \rho_c \cdot A \cdot l_h \quad (\text{t})$;

式中, l_h —货舱长度, m。

由货舱内底板至水平连线 LL1 的最大允许距离为 $h_1 = H_{\max} - h$, 则货舱内底板至水平连线之间的最大装货量 P_2 可由下式确定:

$$P_2 = \rho_c \cdot h_1 \cdot A_{HN} \quad \text{t} \quad (3.9)$$

式中, h_1 —舱底内板至水平连线 LL1 的最大允许距离, m;

A_{HN} —货舱舱底等效面积, m^2 , 按 V_{HN}/h_{HN} 计算;

V_{HN} —中纵剖面上量至甲板线的货舱容积, m^3 ;

h_{HN} —中纵剖面上从内底量至甲板线的货舱高度, m;

由以上各式可确定在考虑货舱均布载荷许用负荷量时货舱最大许用装载量为:

$$P_{\max} = P_1 + P_2 = \frac{1}{3} \cdot \rho_c \cdot B^2 \cdot l_h \cdot \tan \frac{\delta}{2} + p_d \cdot A_{HN} - \frac{1}{2} \cdot B \cdot \rho_c \cdot \tan \frac{\delta}{2} \quad \text{t} \quad (3.10)$$

当然, 如果上式确定的装货量超过了装载手册中提供的设计最大许用装货量 M_{\max} , 则应取装载手册中提供的最大许用装货量。

3.2.4 编程计算考虑货物休止角时货舱最大允许装货量

为了确保散货船舱底均布载荷不超过许用值, 必须要控制货舱的装载量。为了便于航海人员确切的了解任一货舱的最大许用装载量, 笔者运用 MICROSOFT EXCEL 编制了简化程序, 用于计算不同密度、不同静止角的固体散货在任一货舱的最大许用装载量和最大许用装载高度, 如图 3.2, 并分别绘制了最大许用装载高度、最大许用装载量与货物密度关系曲线, 如图 3.3、3.4。这里以本章 3.2.1 中提到的“XX 海”轮 No.3 货舱为例来介绍该程序。图 3.2 中: 表 1 为有关货舱数据及货物静止角的值。其中, 有关货舱的数据可以通过装载手册查取, 对于固定货舱, 货舱的数据已经确定。只要在表 1 填入货物的休止角, 表 2 就可以计算该舱的最大装货量。该程序也适用其它船舶及其它货舱, 只要先填入货舱的有关数据即可。该

程序可作为船舶装载仪的补充程序，供航海人员在生产实践中使用。

由不进行平舱时货物密度与货舱最大许用载货量关系曲线，可以发现在货物密度较小时，曲线随着密度的增大而上升，到达顶点后随着密度的增大而下降。这说明，考虑货物静止角时最大许用载货量的最大值不发生在货物密度最大处。本例中货舱最大许用装货量的最大值发生在密度为 1.64 t/m^3 处。

考虑货物休止角时货舱最大装货量			
表1		表2	
项目	数值	货物密度 (t/m^3)	最大装货高 度(m)
允许负荷(t/m^3)	39.57	1.0	24.15
舱高(m)	24.15	1.2	24.15
货舱底面积(m^2)	936.8	1.4	24.15
舱长(m)	20.8	1.6	24.15
舱宽(m)	45	1.8	21.98
静止角($^\circ$)	30	2.0	19.79
最大装货量(t)	37250	2.2	17.99
		2.4	16.49
		2.6	15.22
		2.8	14.13
		3.0	13.19

图 3.2 考虑货物休止角时货舱最大装货量计算表

Fig.3.2 Calculating table of maximum allowable cargo mass considering repose angle of cargo

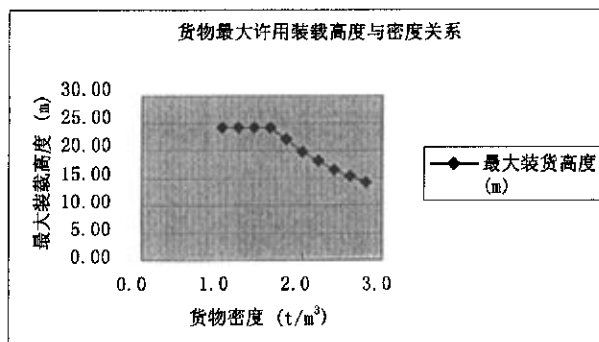


图 3.3 货物最大允许装货高度与货物密度关系曲线

Fig. 3.3 Curve for maximum allowable height

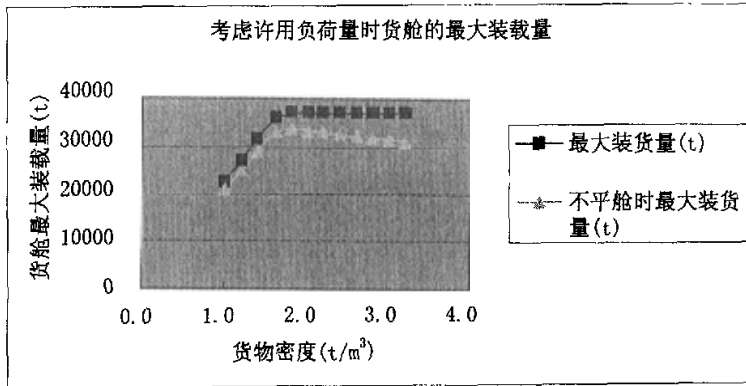


图 3.4 考虑货物休止角时货舱允许装货量与货物密度关系曲线

Fig. 3.4 Curve for maximum allowable mass

3.3 散货船船底结构局部强度计算方法

3.3.1 散货船船底结构应力合成

散货船船底是由许多构件组成的复杂结构，每一构件各自承担着一定的作用，其受力与变形是极其复杂的。在承受外部载荷后，将顺序地传递着所受到的力，并发生相应的变形。舱底是船体梁的下翼板，受到很大的总纵弯曲应力，此外还承受货物重量、压载水及舷外水压力等荷重作用。散货船一般为纵骨架双层底结构，包括船底板和舱底内板。这里以船底板为例，为讨论方便，假定在船底结构上只作用着水压力。直接承受水压力的构件是船底板，它在支持周界发生变形，并以反力形式将水压力传给支持周界。船底板将受到的水压力主要传给纵骨，部分传给肋板、底纵桁、舷侧及横舱壁，纵骨受传来力的作用而发生弯曲，并又以反力的形式将力传给肋板或横舱壁，于是也引起船底板架的弯曲变形，于是又以反力的形式将力传给板架的支持周界（舷侧及横舱壁）^[26,27]，如图3.5所示。

由上面的分析可知，同一构件在受力过程中可能受到多种作用，产生多种应力。船底板由直接承受的水压力产生了板格弯曲应力（记为 σ_4 ）；纵骨受传来的水压力作用而发生弯曲变形时，与纵骨相连的一部分外板又将随纵骨一起弯曲而产生弯曲应力（记为 σ_3 ）；依此类推，在船底中还有板架弯曲应力（记为 σ_2 ）；此外，在船底板中还有总纵弯曲应力（记为 σ_1 ）。可见，船底纵桁同时承受总纵

弯曲和板架弯曲两类应力；船底纵骨同时承受总纵弯曲、板架弯曲、纵骨弯曲三类应力；船底板同时承受总纵弯曲、板架弯曲、纵骨弯曲及板的弯曲四类应力。

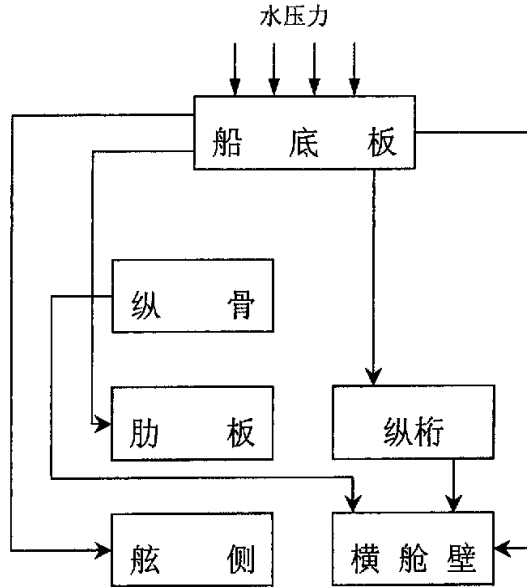


图3.5 散货船双层底结构传力示意图

Fig. 3.5 transferring pressure for double bottom structure of bulk carrier

上述四种应力中， σ_2 、 σ_3 和 σ_4 为局部弯曲应力。为了按合成应力校核总纵强度，需要对总纵弯曲应力和局部弯曲应力进行合成。求得合成应力后，就应将它们与相应位置的许用应力进行比较，以判断船体结构的总纵强度是否足够。但对于局部强度校核，需要对船底板、船底纵骨和船底板架所受应力分别进行计算，再与许用应力进行比较，以判断船体结构的局部强度是否足够。

3.3.2 散货船船底板架局部强度计算

舱底是船体梁的下翼板，受到很大的总纵弯曲应力，此外还承受货物重量、压载水及舷外水压力等横向荷重作用。在总纵强度校核时，船底纵桁应力要与总纵弯曲应力合成，此时船底板架的计算载荷应取相应的总纵弯曲计算时的载荷状态和波浪位置的水头高度。在局部强度计算时，船底板架计算荷重为舷外水压与

货物反压力的差值。船底一般是由多根交叉构件和很多主向梁组成的板架。对于纵骨架式板架，载荷通过纵骨传给实肋板，交叉构件也只承受节点反力，如图3.6。

多根交叉构件板架的计算可采用船舶结构力学中介绍的主向梁节点挠度选择法近似计算。

1. 对于舱长较短的船底板架（如舱长 l 与板架计算宽度 B 之比小于0.8时），为确定板架中桁材的弯曲应力，可以采用单跨梁的计算公式^[26]，即

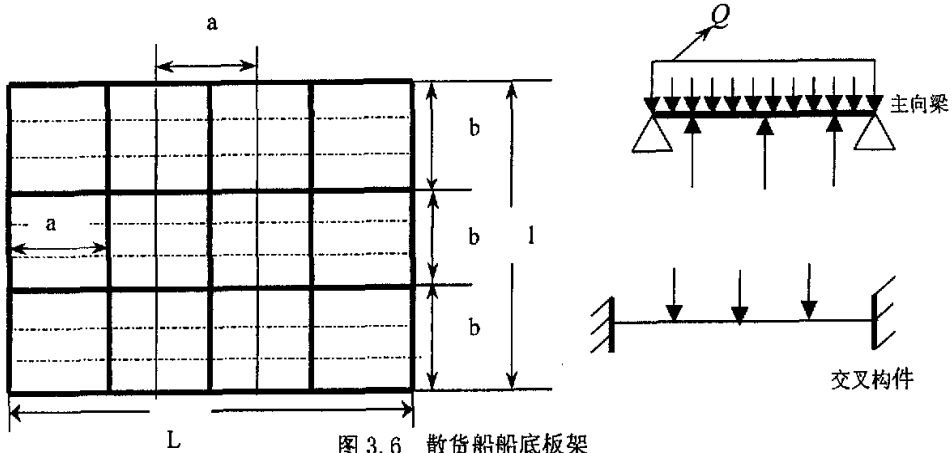


图 3.6 散货船船底板架
Fig.3.6 bulk carrier bottom plate panel

$$\text{支座剖面处弯矩: } M_0 = \frac{Ql}{12} \quad \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\text{跨长中点处弯矩: } M_1 = \frac{Ql}{24} \quad \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\text{船底板中桁材架跨长中点处弯曲应力: } \sigma_2 = \frac{M_1}{W} \quad \text{N/mm}^2$$

2. 对于 $l/B \geq 0.8$ 的板架，板架中桁材的弯曲应力可按下述计算公式计算：

$$\text{支座剖面处弯矩: } M_0 = \nu_1 \frac{Ql}{12} \quad \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\text{跨长中点处弯矩: } M_1 = \nu_2 \frac{Ql}{24} \quad \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\text{中央肋板在中桁材处弯矩: } M = \nu_3 \frac{Ql}{8} \quad \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\text{船底板架中桁材跨长中点处弯曲应力: } \sigma_2 = \frac{M_1}{W} \quad \text{N/mm}^2$$

式中， W —中桁材对船底板的剖面模数；

Q —作用在中桁材上的载荷, $Q = qcl$;

Q_1 —作用在肋板上的载荷, $Q_1 = qaB$;

q —板架的载荷强度, N/m^2 ; c —纵桁间距, m ;

l —纵桁跨度, m ; a —肋板间距, m ; B —肋板跨度, m ;

ν_1 、 ν_2 、 ν_3 —系数, 由板架长宽比 l/B 及中桁材与旁桁材的惯性矩之比决定, 具体取值见参考文献^[26]。

3.3.3 利用货舱载重量限额与吃水函数关系校核局部强度的原因

任何情况下必须保证船舶货舱各构件的实际应力 σ 不超过构件的最大许用应力 $[\sigma]$ 。对于构件的最大许用应力根据构件的材料确定 (参见文献^[30])。货舱构件的实际总应力为局部应力 σ_a 、静水弯曲应力 σ_s 和波浪弯曲应力 σ_w 之和, 即

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_s + \sigma_w$$

其中, 对于静水弯曲应力 σ_s 和波浪弯曲应力 σ_w , 如应用船体梁理论, 可以用下式近似计算:

$$\sigma_s = \frac{M_s}{W}; \quad \sigma_w = \frac{M_w}{W}$$

式中, M_s —构件剖面的静水弯矩, 可以由式 2.2 确定;

M_w —构件剖面的波浪弯矩, 可以由式 2.4 确定;

W —构件对中和轴的剖面模数。

对于局部应力 σ_a 是货物的压力和水压力共同作用而形成的, 最大允许局部应力 $[\sigma_a]$ 可以用下式确定:

$$[\sigma_a] = [\sigma] - \sigma_s - \sigma_w$$

实际应力 σ 需要采用有限元 (FEM) 方法进行计算。在大型计算机广泛应用之后, 基于有限元的计算方法被学术界和造船界普遍采用。其特点^[6]是:

- ① 可以将总强度与局部强度一起考虑, 即在确定了船体整个受力情况的前提下, 可将船体各组成结构中的应力和变形一起计算出来;

- ②完全可以计算空间结构，无须一定要将空间结构化为平面结构；
- ③可以不将骨架和板分开，而将骨架和板一起考虑。

世界各船级社(CCS、GL、DNV、LR 和 BV 等)大都建议对货舱段的局部强度采用基于有限元的直接计算方法。中国船级社(CCS)在 2003 年制定了《散货船结构直接计算分析指南》^[90]用来指导结构的直接计算分析。CCS 建议利用如图 3.7 的三维有限元模型，分析范围为船中货舱区的 1/2 个货舱+1 个货舱+1/2 个货舱，垂向范围为型深。在计算分析时，将静水载荷、波浪载荷、货物压力和水压力加入模型中，应用有限元计算程序计算主要构件实际应力^[91]。其中，水压力主要取决于吃水，货物压力主要取决于货物重量，其确定方法参见文献^[90]。如在计算过程中，通过改变水压力 and 货物压力来改变局部应力，且始终保证各构件实际应力不超过许用值，则可以确定出不同吃水时货舱的装货重量极限。由于有限元方法超出了本专业研究范围，加之其计算软件非常昂贵，故本文在此无法做更深入研究。

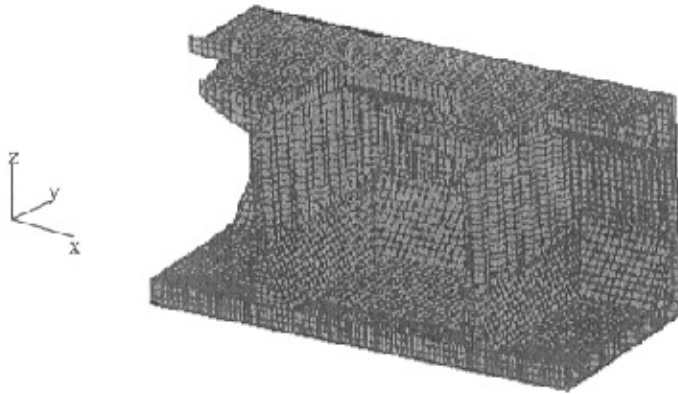


图 3.7 三维有限元模型

Fig.3.7 3-Dimensional FE model

航运界更不便于应用有限元方法校核货舱段的局部强度，所以需要采取更为方便的方法。IACS URS25 对局部强度的要求中规定了若干种船舶必须满足的安全工况，根据这些工况做出每一货舱及相邻货舱的装载量限额与货舱中部吃水的函数关系，确定出货舱载重量的安全范围。若根据该函数关系来审核货舱段的局部

强度就显得非常方便了。

3.4 利用作为吃水函数的货舱载重量极限校核局部强度

3.4.1 船底板架上计算载荷的表示

船底结构局部强度计算载荷主要有货物重量、油水重量和水压力，一般不计结构自重影响，因为后者与前者相比可忽略不计。对于船底板架，作用在船底板架上的计算荷重由货物重量与水压力之差来确定。对于散货船来说，就是用双层底上的净载荷来表示，双层底上的净载荷等于货物及双层底内油水重量之和减去该舱段所受的浮力，可以表示为下式：

$$M_{net} = M_h - d \times B \times l_c \times \rho \quad (3.11)$$

为了计算上更加精确，上式也可以写成下式：

$$M_{net} = M_h - \rho \times A_{HN} \times d \quad (3.12)$$

式中， M_h —货舱内货物重量与双层底内油水载荷重量之和，t；

d —货舱中部吃水，m；

l_c —货舱长度，m；

B —货舱宽度，m，近似等于船舶型宽；

A_{HN} —货舱舱底等效面积， m^2 ，按 V_{HN}/h_{HN} 计算；

V_{HN} —中纵剖面上从内底量至甲板线的货舱容积， m^3 ；

h_{HN} —中纵剖面上从内底量至甲板线的货舱高度，m；

通过对船底结构应力计算（一般采用有限元方法），可以确定双层底所能承受的净载荷极限值；某一货舱段根据吃水容易确定该舱段所受到的浮力，这样就可以确定出在某一吃水情况下最大许用装载量和最小需要装载量。当然也要保证舱内货物重量对货舱内底板产生的均布载荷不能超出允许负荷量。

由以上分析发现：每一货舱及相邻货舱载重量的极限值是该舱段货舱中部吃水的函数，为保证船体结构不受损伤，必须使货舱载重量不能超过极限值，这就需要在航运中应用货舱载重量极限与吃水的函数关系对船舶局部强度进行控制。

IACS URS1A 要求1998年7月1日以后建造的150米及以上的散货船装载手册

及装载仪中提供货舱装载量限额与吃水的函数关系。英国劳氏船级社要求1999年1月1日以后对现有的散货船在配载仪及装载手册中提供了这种函数关系，中国船级社在1999年5月下发的《现有散货船装载手册补充内容的编制、审批及有关技术要求》的通函中建议现有散货船的装载手册中提供各舱随吃水变化的最大/最小许用装载量曲线，但并未作强制要求。中国船级社2002版《钢规》中对装载手册及装载仪中提供作为吃水函数的货舱载货量限额曲线作了强制要求。2003年7月1日生效的IACS UR S25重申了在装载手册和配载仪中提供货舱装载量限额与吃水的函数关系的要求，并规定了多个局部强度校核工况，为建立该函数关系提供了依据和方法。IACS UR S25要求凡是加入国际船级社协会成员的150米及以上的散货船的配载仪及装载手册中都必须提供货舱载货量限额与吃水的函数关系，并要求在航运中应用该函数关系曲线对散货船局部强度进行控制。

应用货舱载重量限额与吃水的函数关系来校核散货船的局部强度已成为强制性要求。在当今航运市场中，虽然一些较新散货船的配载仪和装载手册中提供了作为吃水函数的货舱载货量限额曲线，但是，航运界的许多人士对此知之甚少，甚至对配载仪中的此项功能不知如何使用。下面就该问题进行研究，达到让航海人员熟悉货舱载货量限额与吃水的函数关系的建立方法以及掌握如何应用该函数关系进行散货船强度控制的目的。

3.4.2 IACS UR S25 主要内容及在航运上的意义

为了提高散装货船的安全性，2002年国际船级社协会(IACS)发布了统一要求S25“散货船协调附加标志及其对应设计载荷工况”(Harmonised Notation and Corresponding Design Loading Conditions for Bulk Carriers)^[6]。为在执行时统一理解，中国船级社(CCS)制定了关于执行S25的通函^[6]，通函内容见附录。

该要求对于散货船市场具有里程碑意义，它适用于2003年7月1日及以后签订建造合同、船长150m及以上的散货船。上述日期后，具有相同载货能力的散货船都将拥有同样的标志。凡授予BC-A标志的散货船即可以装载重货、且满载时可以有空舱；凡授予BC-B标志的散货船可以装载重货，但满载时所有舱装货；凡授予BC-C标志的散货船只允许装载密度小于 1.0 t/m^3 的轻货。由于对这些标志的要求是基于统一的设计校核衡准，因此在将来的散货船买卖市场包括租

赁市场, 双方不必再为散货船究竟能载什么样的货物而大伤脑筋, 只要看到统一标志, 无论散货船原先入哪个船级社, 都可以一目了然。散货船授予统一附加标志要求实现了新船设计参数标准化, 对新船设计提出了较高要求, 同时对航运业也提出了新的要求, 主要表现在: 规定了总纵强度校核工况和多个局部强度校核工况, 经过局部强度校核后可以分为航行和港内状态画出最大载货量曲线和最小载货量曲线; 它为建立货舱最大允许载货量及最小需要载货量与货舱中部吃水的函数关系提供了依据; 载货量曲线包括在装载手册和装载仪中, 作为散货船营运过程中必须恪守的准则^[60]。

3.4.3 每一货舱载货量限额与吃水的函数关系的建立

依据IACS UR S25所列航行状态和港内装/卸货状态下的局部强度校核工况, 可以建立每一货舱的最大允许载货量/最小需要载货量与该货舱中部吃水的函数关系, 并绘制该函数关系曲线^[29]。

1. 相关定义

T: 夏季载重线吃水, m;

ρ : 海水密度, 1.025t/m^3 ;

A_{HN} : 货舱舱底等效面积, m^2 , 按 $V_{\text{HN}}/h_{\text{HN}}$ 计算;

V_{HN} : 中纵剖面上从内底量至甲板线的货舱容积, m^3 ;

h_{HN} : 中纵剖面上从内底量至甲板线的货舱高度, m;

T_{HB} : 重压载工况下的舱中部吃水, m;

d: 舱中部吃水, m;

M: 货舱载货量, t;

M_{H} : 最大吃水时, 均匀装载工况下, 货舱的实际载货量, t;

M_{HD} : 最大吃水时, 有指定空舱组的设计装载工况下, 货舱最大允许载货量, t;

M_{Full} : 均匀装载工况下, 货物取虚拟密度 (虚拟密度=货舱载货量/货舱容积, 最小取 1.0t/m^3), 装至舱口盖围板顶部时, 货舱的载货量。 M_{Full} 应不小于 M_{H} , t;

$M_{\text{DB-F}}$: 货舱下双层底内燃油舱 (如设有) 的燃油装载量, t;

$M_{\text{DB-B}}$: 货舱下双层底内压载水舱的压载水装载量, t。

2. 函数关系的建立

限于篇幅, 本文仅以授予BC-A协调标志的船舶为例, 依据IACS UR S25中的局部强度校核工况及要求, 阐述货舱最大载货量/最小载货量与货舱中部吃水函数关系的建立方法。

1) BC-A 协调标志的重货舱

重货舱是指在设计上采取了加强结构, 在设计的全载隔舱装载工况下, 用来装货的货舱, 对于有奇数个货舱的散货船, 通常为第奇数货舱。

(1) 海上最大许用载货量

根据 5.4.2 (附录, 本节以下同) 要求, 当货舱吃水为最大吃水 T 时, 货舱及双层底内载荷总重量可为 $M_{HD}+10\%M_H+M_{DB-F}$, 此时该舱段舱底所受浮力为 $\rho \cdot A_{HN} \cdot T$, 双层底上的净载荷为 $M_{HD}+0.1M_H+M_{DB-F}-\rho \cdot A_{HN} \cdot T$; 当货舱吃水 d 小于最大吃水 T 时, 该舱段舱底所受浮力变为 $\rho \cdot A_{HN} \cdot d$, 浮力减小值为 $\rho \cdot A_{HN} \cdot (T-d)$, 为保证该吃水时该货舱双层底上的净载荷不超过上述的 $M_{HD}+0.1M_H+M_{DB-F}-\rho \cdot A_{HN} \cdot T$, 需要使最大吃水 T 对应的货舱及双层底内载荷的总重量 $M_{HD}+10\%M_H+M_{DB-F}$ 减去浮力的减小值, 即该舱总重量载荷不应超过 $M_{HD}+0.1M_H+M_{DB-F}-\rho \cdot A_{HN} \cdot (T-d)$, 该值再扣除双层底内燃油及压载水重量, 即为该舱在吃水为 d 时的海上最大许用载货量, 用公式表示为:

$$M = (M_{\max} + 0.1M_H - M_{DB-F}) + \rho \cdot A_{HN}(d - T) - M_{DB-B} \quad t \quad (3.13)$$

式中, $M_{\max} = M_{HD} + M_{DB-F}$

(2) 港内最大许用载货量

根据5.6.1港内, 67%最大吃水时, 任一货舱应能装载航行状态下的最大允许装货量。与海上最大许用载货量的确定方法类似, 可以得到港内最大许用载货量的表达式为:

$$M = (M_{\max} + 0.1M_H - M_{DB-F}) + \rho \cdot A_{HN}(d - 0.67T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad t \quad (3.14)$$

(3) 海上最小需要载货量

根据 5.2.2, 最大吃水的状态下, 货舱下双层底内为空舱时, 该货舱能装 $50\%M_H$ 的货物;

根据 5.2.3, 最大压载吃水时, 货舱下双层底内为空舱时, 该货舱能为空舱, 那么, 当达到最大吃水时, 浮力较最大压载时增大 $\rho \cdot A_{HN}(T - T_{HB})$, 为使双层底上的净载荷不超过允许值, 则舱内及双层底内载荷的重量之和需要不小于浮力的增大值 $\rho \cdot A_{HN}(T - T_{HB})$;

根据 5.3.2, 83%最大吃水时, 任一货舱下双层底内所有舱空舱时, 该货舱应能空舱。那么, 当达到最大吃水时, 浮力增大 $0.17\rho \cdot A_{HN}T$, 为使双层底上的净载荷不超过允许值, 则舱内及双层底内载荷的重量之和需要不小于 $0.17\rho \cdot A_{HN}T$ 。

由以上三条要求, 可以确定当货舱达到最大吃水时, 舱内及双层底内的总载荷的最小重量 M_{\min} 取 $0.17\rho \cdot A_{HN}T$, $\rho \cdot A_{HN}(T - T_{HB})$ 与 $0.5M_H$ 的较小者。然后, 与确定海上最大允许载货量的方法类似, 很容易确定海上最小需要载货量为:

$$M = M_{\min} + \rho \cdot A_{HN}(d - T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad \text{t} \quad (3.15)$$

(4) 港内最小需要载货量

利用上式, 再根据 5.6.3, 港内最小载货量可以适当减少, 减少量为航行状态下最大吃水时最大允许载货量的 15%, 易得到港内最小需要载货量为:

$$M = (M_{\min} - 0.15M_{\max}) + \rho \cdot A_{HN}(d - T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad \text{t} \quad (3.16)$$

其中, $M_{\max} = M_H + M_{DB-F}$
 M_{\min} 取 $0.17\rho \cdot A_{HN}T$, $\rho \cdot A_{HN}(T - T_{HB})$ 与 $0.5M_H$ 中的小者

2) BC-A协调标志的空舱

空舱是指在设计的满载隔舱装载工况下, 不用来装货的货舱, 对于有奇数个货舱的船舶, 通常为第偶数货舱。

(1) 海上最大许用载货量

根据 5.3.1, 67%最大吃水时, 任一货舱下双层底内燃油舱(如设有时)100%满舱, 双层底内压载舱空舱时, 该货舱应能装 M_{Full} 的货物。容易确定海上最大许用载货量为:

$$M = M_{\max} + \rho \cdot A_{HN}(d - 0.67T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad t \quad (3.17)$$

(2) 港内最大许用载货量

根据上式及5.6.3可以确定港内最大许用载货量为:

$$M = 1.15M_{\max} + \rho \cdot A_{HN}(d - 0.67T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad t \quad (3.18)$$

(3) 海上最小需要载货量

根据5.4.1可知, 作为指定空舱的货舱在最大吃水时可以空舱, 所以任何吃水时海上最小需要载货量为:

$$M = 0 \quad t$$

(4) 港内最小需要载货量

根据5.4.1可知, 所以任何吃水时港内最小需要载货量为:

$$M = 0 \quad t$$

其中, $M_{\max} = M_{Full}$

根据 IACS UR S25 对局部强度要求, 与确定 BC-A 协调标志船舶货舱最大许用载货量/最小需要载货量与货舱中部吃水函数关系的方法类似, 可以确定其它协调标志船舶的货舱的最大载货量/最小载货量与货舱中部吃水函数关系, 结果如下:

3) BC-B {No MP} 或 BC-C {No MP} 协调标志

海上最大许用载货量:

$$M = M_{\max} + \rho \cdot A_{HN}(d - T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad t \quad (3.19)$$

港内最大许用载货量:

$$M = M_{\max} + \rho \cdot A_{HN}(d - 0.67T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad t \quad (3.20)$$

海上最小需要载货量:

$$M = M_{\min} + \rho \cdot A_{HN}(d - T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad t \quad (3.21)$$

港内最小需要载货量:

$$M = (M_{\min} - 0.15M_{\max}) + \rho \cdot A_{HN}(d - T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad t \quad (3.22)$$

其中, $M_{\max} = M_{Full}$
 M_{\min} 取 $\rho \cdot A_{HN}(T - T_{HB})$ 与 $0.5M_H$ 的小者

4) BC-A {No MP} 协调标志的重货舱

海上最大许用载货量:

$$M = (M_{\max} + 0.1M_H - M_{DB-F}) + \rho \cdot A_{HN}(d-T) - M_{DB-B} \quad \text{t} \quad (3.23)$$

港内最大许用载货量:

$$M = (M_{\max} + 0.1M_H - M_{DB-F}) + \rho \cdot A_{HN}(d-0.67T) - M_{DB-B} \quad \text{t} \quad (3.24)$$

海上最小需要载货量:

$$M = M_{\min} + \rho \cdot A_{HN}(d-T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad \text{t} \quad (3.25)$$

港内最小需要载货量:

$$M = (M_{\min} - 0.15M_{\max}) + \rho \cdot A_{HN}(d-T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad \text{t} \quad (3.26)$$

其中, $M_{\max} = M_H + M_{DB-F}$
 M_{\min} 取 $\rho \cdot A_{HN}(T - T_{HB})$ 与 $0.5M_H$ 的小者

5) BC-A {No MP} 协调标志的空舱

海上最大许用载货量:

$$M = M_{\max} + \rho \cdot A_{HN}(d-T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad \text{t} \quad (3.27)$$

港内最大许用载货量:

$$M = M_{\max} + \rho \cdot A_{HN}(d-0.67T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad \text{t} \quad (3.28)$$

海上最小需要载货量:

$$M = 0 \quad \text{t}$$

港内最小需要载货量:

$$M = 0 \quad \text{t}$$

其中, $M_{\max} = M_{Full}$

6) BC-B 或 BC-C 协调标志

海上最大许用载货量:

$$M = M_{\max} + \rho \cdot A_{HN}(d-0.67T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad \text{t} \quad (3.29)$$

港内最大许用载货量:

$$M = 1.15M_{\max} + \rho \cdot A_{HN}(d - 0.67T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad t \quad (3.30)$$

海上最小需要载货量:

$$M = M_{\min} + \rho \cdot A_{HN}(d - T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad t \quad (3.31)$$

港内最小需要载货量:

$$M = (M_{\min} - 0.15M_{\max}) + \rho \cdot A_{HN}(d - T) - M_{DB-B} - M_{DB-F} \quad t \quad (3.32)$$

其中, $M_{\max} = M_{Full}$
 M_{\min} 取 $0.17\rho \cdot A_{HN}T$ 、 $\rho \cdot A_{HN}(T - T_{HB})$ 与 $0.5M_H$ 的小者

3.4.4 相邻两货舱载货量限额与吃水函数关系的建立

根据IACS UR S25对散货船局部强度要求, 可以建立航行状态和港内装/卸货状态下货舱的最大允许载货量/最小需要载货量与吃水的函数关系并作出该函数关系曲线^[29]。

1. 相关定义

A_H : 相邻两货舱舱底等效面积, m^2 , 取为 $A_{1HN} + A_{2HN}$;

A_{1HN} 、 A_{2HN} : 分别为相邻两货舱舱底等效面积, m^2 ;

M : 载货量, t ;

M_{1H} 、 M_{2H} : 分别为相邻两货舱的载货量 M_H ;

M_{1Full} 、 M_{2Full} : 分别为相邻两货舱的载货量 M_{Full} ;

M_{1HD} 、 M_{2HD} : 分别为相邻两货舱的最大允许载货量 M_{HD} ;

M_{1DB-F} 、 M_{2DB-F} : 分别为相邻两货舱下双层底内燃油舱(如设有)的燃油装载量 M_{DB-F} ;

M_{1DB-B} 、 M_{2DB-B} : 分别为相邻两货舱下双层底内压载水舱的压载水装载量;

T 、 ρ 、 M_{Full} 、 M_{1HD} 同3.4.3—1的定义。

2. 相邻两货舱最大许用载货量/最小需要载货量与吃水的函数关系建立

1) BC-A、BC-B或BC-C协调标志

(1) 海上最大许用载货量:

根据5.3.3(附录, 本节以下同)确定,

$$M = M_{\max} + \rho \cdot A_H(d - 0.67T) - M_{1DB-B} - M_{2DB-B} - M_{1DB-F} - M_{2DB-F} \quad t$$

(3.33)

(2) 港内最大许用载货量:

根据5.3.3和5.6.3确定,

$$M = 1.15M_{\max} + \rho \cdot A_{HN}(d - 0.67T) - M1_{DB-B} - M2_{DB-B} - M1_{DB-F} - M2_{DB-F} \quad t \quad (3.34)$$

(3) 海上最小需要载货量:

根据5.3.4确定,

$$M = \rho \cdot A_H(d - 0.75T) - M1_{DB-B} - M2_{DB-B} - M1_{DB-F} - M2_{DB-F} \quad t \quad (3.35)$$

(4) 港内最小需要载货量:

根据5.3.4和5.6.3确定,

$$M = -0.15M_{\max} + \rho \cdot A_{HN}(d - 0.75T) - M1_{DB-B} - M2_{DB-B} - M1_{DB-F} - M2_{DB-F} \quad t \quad (3.36)$$

其中, $M_{\max} = M1_{Full} + M2_{Full}$

2) BC-A协调标志且相邻两舱均为重货舱

(1) 海上最大许用载货量:

根据5.4.3确定.

$$M = (M_{\max} + 0.1M1_H + M2_H - M1_{DB-F} - M2_{DB-F}) + \rho \cdot A_H(d - T) - M1_{DB-B} - M2_{DB-B} - M1_{DB-F} - M2_{DB-F} \quad t \quad (3.37)$$

(2) 港内最大许用载货量:

根据5.4.3和5.6.3确定,

$$M = 1.15M_{\max} + \rho \cdot A_H(d - T) - M1_{DB-B} - M2_{DB-B} - M1_{DB-F} - M2_{DB-F} \quad t \quad (3.38)$$

(3) 海上最小需要载货量:

根据5.3.4确定,

$$M = \rho \cdot A_H(d - 0.75T) - M1_{DB-B} - M2_{DB-B} - M1_{DB-F} - M2_{DB-F} \quad t \quad (3.39)$$

(4) 港内最小需要载货量:

根据5.3.4和5.6.3确定。

$$M = -0.15M_{\max} + \rho \cdot A_{HN}(d - 0.75T) - M1_{DB-B} - M2_{DB-B} - M1_{DB-F} - M2_{DB-F} \quad t \quad (3.40)$$

其中， $M_{\max} = M1_H + M2_H + M1_{DB-F} + M2_{DB-F}$

3.4.5 货舱中部吃水的确定

船舶吃水是通过观测水尺标志得到的，水尺标志通常勘划在船首、船中和船尾。而每一货舱的中部吃水是无法直接观测到的，所以只能通过计算得到。

1. 船舶平均吃水的计算

通常船舶纵倾是小角度的，可以认为是等容纵倾。船舶平均吃水也称等容吃水，即漂心处的吃水。根据船舶静力学知识^{[25][27]}，船舶平均吃水 d_m 计算公式为：

$$d_m = \frac{d_F + d_A}{2} + \frac{t \cdot x_f}{L_{BP}} \quad m \quad (3.41)$$

2. 货舱中部吃水计算

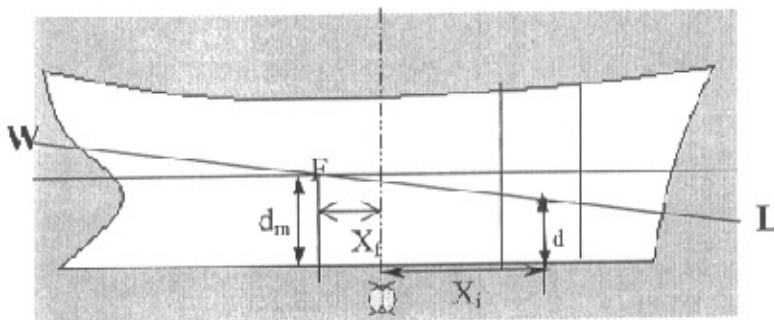


图3.8 确定货舱中部吃水示意图

Fig.3.8 Draft at mid-hold position

如图3.8，根据船舶静力学知识，某一货舱中部吃水可以很容易推导出来。

$$d = d_m + \frac{t \cdot (x_i - x_f)}{L_{BP}} \quad m \quad (3.42)$$

式中， d_F —船舶首吃水，m；

d_A —船舶尾吃水, m;

t —船舶吃水差, $t = d_F - d_A$, m;

x_{fi} —漂心坐标, m;

x_i —某货舱中部纵向坐标, 通常近似取舱容中心纵向坐标, m;

L_{BP} —船舶首尾垂线之间距离, 即型长, m。

3.4.6 为改善局部强度采取的压载水调整方案

1. 满足货舱最大装货量要求的压载水调整方案

如果在某一装载状态下, 船舶某一货舱的载货量超过该吃水时的最大许用值(但低于货舱在最大吃水时的最大允许装载量 M_{max}), 很多时候, 可以通过调整压载水改变船舶浮态, 也就是增加该舱中部吃水使该舱段所受浮力增加, 减小双层底上的净载荷, 使该货舱的载货量不超过该吃水时的最大许用载货量, 当然在哪一压载舱注入或排出多少吨压载水, 这里有多种方案, 主要思路如下:

1) 尽可能将危险货舱(或货舱段)下的压载水排空或转移至其它压载舱;

2) 调整吃水差, 调整的原则是使危险货舱处的吃水增大, 但要保证船舶浮态, 总纵强度和其它货舱(或货舱段)局部强度满足要求。采取的措施主要有:

(1) 在危险货舱邻近的压载舱注入压载水, 使危险货舱吃水增大;

(2) 在远离危险货舱的压载舱排出压载水, 使危险货舱吃水增大。

3) 禁止向危险货舱双层底内继续注入压载水。

2. 满足货舱最小装货量要求的压载水调整方案

如果在某一装载状态下, 船舶某一货舱的载货量小于该吃水时的最小需要载货量, 有时可以采取在该货舱双层底内注入适量压载水的方法来减小货舱双层底上的净载荷, 但要注意压载水注入后, 该货舱中部吃水会增加, 该舱所受浮力也增加, 所以需要比该舱原吃水时所缺少的载货量值略大的压载量。

3. 压载水调整重量的计算

首先根据货舱载重量限额与吃水的函数关系确定出要保证该危险货舱(或货舱段)局部强度满足要求所要求的货舱中部最小吃水 d_1 ;

实践中可以采取在多个压载舱改变压载水重量，若设在某一非危险货舱下双层面内注入（或排出） P_i 吨压载水，则船舶平均吃水的变化量 δd 为：

$$\delta d = \frac{\sum P_i}{100 \cdot TPC} \quad \text{m} \quad (3.43)$$

式中，TPC—厘米吃水吨数，t/cm。

注入（或排出）压载水后船舶新的平均吃水为：

$$d_{m1} = d_m + \delta d \quad \text{m} \quad (3.44)$$

设欲注入（或排出）压载水的压载舱舱容中心坐标为 x_{pi} ，则注入（或排出）压载水后吃水差改变量 δt 为：

$$\delta t = \frac{\sum P_i \cdot (x_{pi} - x_f)}{100 \cdot MTC} \quad \text{m} \quad (3.45)$$

注入（或排出）压载水后新的吃水差 t_1 为：

$$t_1 = t + \delta t \quad \text{m} \quad (3.46)$$

然后，用 d_{m1} 代替 d_m ，用 t_1 代替 t ，代入货舱中部吃水计算公式3.42，整理得

$$d_1 = d_m + \frac{\sum P_i}{100 \cdot TPC} + \frac{[100 \cdot t \cdot MTC + \sum P_i \cdot (x_{pi} - x_f)] \cdot (x_i - x_f)}{100 \cdot MTC \cdot L_{BP}} \quad \text{m} \quad (3.47)$$

上式中，各压载舱舱容中心坐标 x_{pi} 已知，所以如果只调整一个压载舱的压载水，则可以直接从上式可以反解出在指定的压载舱应注入（或排出）压载水的重量；如果要改变多个压载舱的压载水重量，则上式实际上是一个关于 P_i 的一次多项式， P_i 可有不同的取法，实践中在保证船舶浮态、稳性和强度的前提下，可根据实际情况确定调整方案。

3.4.7 编程计算作为吃水函数的货舱载货量极限

1. 程序介绍

为保证散货船货舱段的局部构件不受损伤，货舱的装载量不得超出作为吃水函数的每一货舱及相邻两货舱的载重极限（局部装载极限）。鉴于目前航运市场上，大量散货船的装载手册及配载仪中未提供该函数关系，笔者以本章3.2.1节中提到的“XX海”轮No.3舱（重货舱）与No.2舱（指定空舱）为例，采用MICROSOFT

EXCEL 编制计算货舱载货量极限的程序,如图3.9、3.11、3.13,并绘制吃水与货舱载货量极限函数关系曲线,如图3.10、3.12、3.14。

图3.9、3.11、3.13中:左侧的表1和表3为有关货舱的数据及船舶首尾吃水、漂心坐标、双层底内油水重量,对于某一货舱及相邻两货舱的有关资料可以利用装载手册并参照本文例子确定。对于固定货舱,货舱的有关数据就已固定,只要在表1和表3内输入首、尾吃水、漂心坐标、双层底内油水重量,即可以在表4内计算出该舱或相邻两货舱的最大许用装载量和最小需要装载量。该程序也适用其它BC-A协调标志船舶及其它货舱,只要先填入有关货舱的数据即可。该程序可作为船舶装载仪的补充,供航海人员在生产实践中校核局部强度时使用。

2.程序实例

1)“XX海”轮船舶主尺度

类型: CAPE SIZE BULK CARRIER

总 长: 289.0 m; 垂线间长: 279.0 m; 型 宽: 45.0 m;

型 深: 24.5 m; 夏季满载吃水: 18.1 m; 总载重量: 175000 t;

船 级: CCS; 附加标志: BC-A, Holds Nos 2, 4, 6 and 8 may be empty.

2)货舱数据的确定

(1) No. 3舱(重货舱)

船舶夏季载重线吃水 $T = 18.1\text{m}$; 中纵剖面上从内底至甲板线的货舱容积 $V_{\text{HN}} = 21828\text{ m}^3$; 中纵剖面上从内底量至甲板线的货舱高度 $h_{\text{HN}} = 23.3\text{ m}$; 重压载工况下的舱中部吃水 $T_{\text{HB}} = 8.94\text{ m}$; 最大吃水时, 均匀装载工况下, 货舱的实际载货量 $M_{\text{H}} = 19592\text{ t}$; 最大吃水时, 货舱的最大允许载货量 $M_{\text{HD}} = 37250\text{ t}$; 货舱下双层底内燃油装载量 $M_{\text{DB-F}} = 0\text{ t}$; 按 $V_{\text{HN}}/h_{\text{HN}}$ 计算得到舱底等效面积 $A_{\text{HN}} = 931.8\text{ m}^2$ 。

(2) No. 2舱(空舱)

船舶夏季载重线吃水 $T = 18.1\text{m}$; $V_{\text{HN}} = 21712\text{ m}^3$; $h_{\text{HN}} = 23.3\text{ m}$; 该货舱总舱容为 21977 m^3 , 货物取虚拟密度(虚拟密度 = 货舱载货量/货舱容积, 最小取 1.0t/m^3), 货舱的载货量为 21977 t , 该值大于均匀装载工况下, 货舱的实际载货量 M_{H} , 所以, $M_{\text{Full}} = 21977\text{ t}$; 货舱下双层底内无燃油舱; 按 $V_{\text{HN}}/h_{\text{HN}}$ 计算得到货舱舱底等效面积 $A_{\text{HN}} = 936.8\text{ m}^2$ 。

(3) 相邻两货舱: No.2舱(空舱)与No.3舱(重货舱)

根据No.2舱、No.3舱数据及3.4.4—1中的定义，很容易确定下面的数据：

$$T = 18.1\text{m}$$

$$M1_{\text{Full}} = 21977\text{ t}$$

$$M2_{\text{Full}} = 22094\text{ t}$$

$$A1_{\text{HN}} = 931.8\text{ m}^2$$

$$A2_{\text{HN}} = 936.8\text{ m}^2$$

BC-A协调标志的重货舱				
表1		表2		
项目	数值	吃水	海上最大装货量(t)	港内最大装货量(t)
满载吃水(米)	18.1	0:00	21829	27561
舱底至主甲板舱容(立方米)	21828	9:07	30535	36270
舱高(米)	23.3	10:09	31514	37250
均匀装载时装货量(吨)	19592	16:06	37250	37250
随舱装载时最大载货量(吨)	37250	16:58	37250	37250
重压载时吃水(米)	8.94	18:10	37250	37250
燃油重量(吨)	0		0	0
压载水重量(吨)	0		1459	0
表3		表4		
首吃水(米)	17.22	吃水	海上最大	港内最大
尾吃水(米)	17.52	16:30	37250	37250
漂心纵坐标(米)	-2			
该舱舱容中心纵坐标(米)	66.3			
船长(米)	279			

注：白色区域可以更改，输入船舶状态；蓝色区域在货舱改变时输入有关货舱数据。

图3.9 No.3舱载货量限额计算表

Fig.3.9 Calculating table of maximum allowable and minimum required cargo mass in No.3 hold

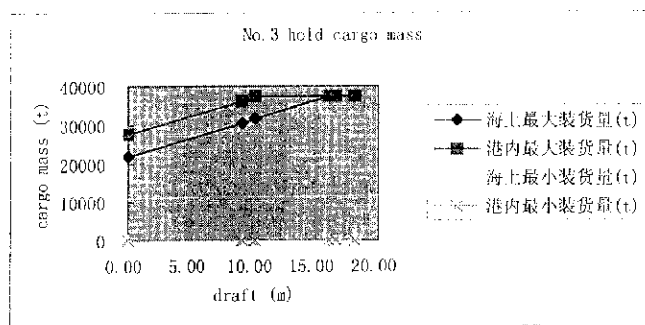


图3.10 No.3舱载货量限额曲线

Fig.3.10 Curve of maximum allowable and minimum required cargo mass in No.3 hold

BC-A协调标志的空舱

表1

项目	数值
满载吃水 (米)	18.1
舱容 (立方米)	21712
舱高 (米)	23.3
最大装货量 (吨)	21977
燃油重量 (吨)	0
压载水重量 (吨)	0

表2

吃水	海上最大装货量(t)	港内最大装货量(t)	海上最小装货量(t)	港内最小装货量(t)
0.00	10394	13691	0	0
8.68	18680	21977	0	0
12.13	21977	21977	0	0
18.10	21977	21977	0	0

表3

首吃水 (米)	9
尾吃水 (米)	10
漂心纵坐标 (米)	-2
舱容中心纵坐标 (米)	90.8
船长 (米)	279

表4

吃水	海上最大	港内最大	海上最小	港内最小
9.17	19157	21977	0	0

注: 白色区域可以更改, 输入船舶状态; 蓝色区域在货舱改变时输入有关货舱数据。

图3.11 No.2舱载货量限额计算表

Fig.3.11 Calculating table of maximum allowable and minimum required cargo mass in No.2 hold

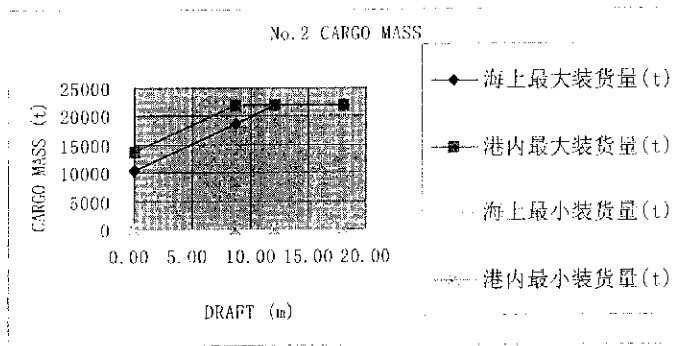


图3.12 No.2舱载货量限额曲线

Fig.3.12 Curve of maximum allowable and minimum required cargo mass in No.2 hold

BC-A协调标志的相邻货舱

表1

项目	数值
满载吃水(米)	18.1
No.2舱容(立方米)	21712
No.2舱高(米)	23.3
No.2最大装货量(吨)	21977
No.2燃油重量(吨)	0
No.2压载水重量(吨)	0
No.3舱容(立方米)	21828
No.3舱高(米)	23.3
No.3最大装货量(吨)	22094
No.3燃油重量(吨)	0
No.3压载水重量(吨)	0

表2

吃水	海上最大装货量(t)	港内最大装货量(t)	海上最小装货量(t)	港内最小装货量(t)
0.00	20843	27454	0	0
3.68	37460	44071	0	0
12.13	44071	44071	0	0
13.58	44071	44071	0	0
17.03	44071	44071	6611	0
18.10	44071	44071	8667	2056

表3

首吃水(米)	10
尾吃水(米)	12
漂心纵坐标(米)	-2
该舱舱容中心纵坐标	78.6
船长(米)	279

表4

吃水	海上最大装货量(t)	港内最大装货量(t)	海上最小装货量(t)	港内最小装货量(t)
10.44	40883	44071	0	0

注：白色区域可以更改，输入船舶状态；蓝色区域在货舱改变时输入有关货舱数据。

图

3.13 No. 2&.No. 3 舱载货量限额计算表

Fig.3.13 Calculating table of maximum allowable and minimum required cargo mass in No.2&3 hold

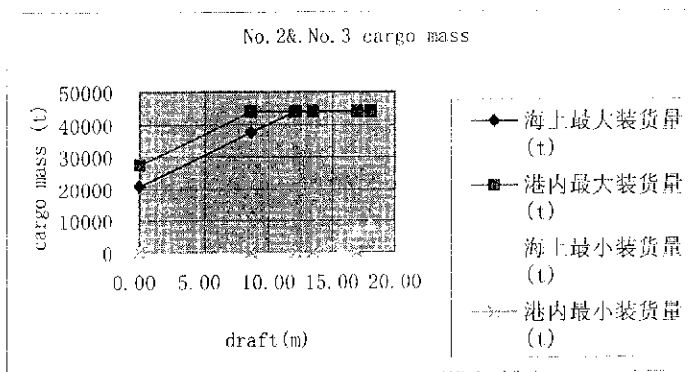


图3.14 No.2&.No.3 舱载货量限额曲线

Fig.3.14 Curve of maximum allowable and minimum required cargo mass in No.2&3 hold

3.4.8 应用货舱载重量限额曲线校核局部强度实例

在散货船营运中，无论是海上航行，还是在港口装卸货期间可能出现的工况，航海人员都应该应用作为吃水函数的每一货舱及相邻两货舱的载重量极限曲线对船舶的局部强度进行校核。一旦发生货舱的载货量不在作为吃水函数的货舱载重量极限范围内，就认为是危险的，应当避免。

由于这里目的在于阐述该函数曲线的应用方法，故以“BIG GLORY”轮装载手册中提供的满载出港时的均匀装载工况为例来阐述作为吃水函数的每一货舱或相邻两货舱的载重量极限曲线在实践中的应用。

1. 海上各货舱及相邻货舱装载量限额与吃水的函数关系曲线应用

对于满载出港的均匀装载工况，货物为积载因数为 $1.30 \text{ m}^3/\text{t}$ 的散粮，货物装载情况如表3.3，油舱装至总舱容的90%，淡水满舱，压载舱全空。

表3.3 满载出港均匀装载工况时货物在各舱分配

Tab.3.3 Cargo weight distribution in each hold at homogeneous load condition

货舱	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
装货重量 (t)	9689	11271	10378	10948	11111

由于海上货舱载货量限制更为严格，所以本工况仅需采用海上各货舱及相邻货舱装载量限额与吃水的函数关系曲线来校核局部强度，校核结果如图3.15。图中，横坐标为装载量，数值上为货舱内货物重量与双层底内载荷重量之和，纵坐标为货舱或货舱段中部吃水，图中的○表示横坐标垂线与纵坐标垂线的交点，最大载重量和最小载重量之间的区域为货舱载重量安全范围。

由图3.15可知，各舱的载重量均处于安全范围，该装该工况满足作为吃水函数的每一货舱或相邻两货舱的载重量极限要求。

2. 港内各货舱及相邻货舱装载量限额与吃水的函数关系曲线应用

对于在港内装货期间出现的工况应采用港内各货舱及相邻货舱装载量限额与吃水的函数关系曲线来校核局部强度，具体校核方法与前例的海上工况类似，限于篇幅，在此不再举例。

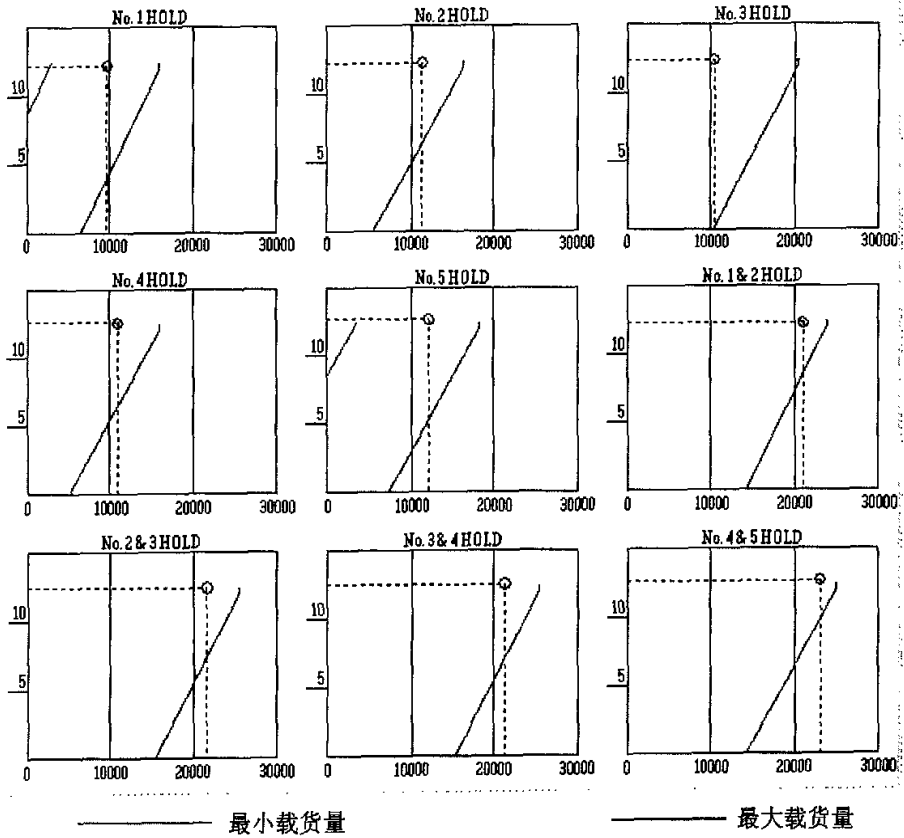


图3.15 “BIG GLORY” 轮海上各货舱及相邻货舱装载量限额校核曲线

Fig. 3.15 Curves of maximum allowable and minimum required cargo mass as function of draught for MV. BIG GLORY

第 4 章 基于新规则的危險工况分析

4.1 “BIG GLORY” 輪船舶资料

类型: HANDY BULK CARRIER;

垂线间长: 185.0 m; 型宽: 32.26 m; 型深: 17.8 m; 夏季满载吃水: 12.5 m;

该轮共五个货舱, 其中第2、4舱为指定的空舱。各货舱设计的最大允许装货重量和单位面积允许负荷量如表4.1:

表4.1 各货舱最大允许装货重量和单位面积允许负荷量

Tab.4.1 Maximum allowable cargo mass and aximum allowable local weight in each hold

舱号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
最大允许装货量 (t)	15970	16400	20430	15900	18200
单位面积允许负荷 (t/m ²)	25.6	18.9	25.6	18.9	25.6

4.2 散货船强度危險工况实例

1. 工况 1

1) 船舶装载状态:

船上装载密度为 3.0 t/m³的矿石, 采取隔舱装载方案, 各舱货物重量分配与装载手册中的建议相同, 如表 4.2, 所有油舱装至舱容的 90%, 所有淡水舱装满, 压载舱全空。

表 4.2 工况 1 各货舱配货重量

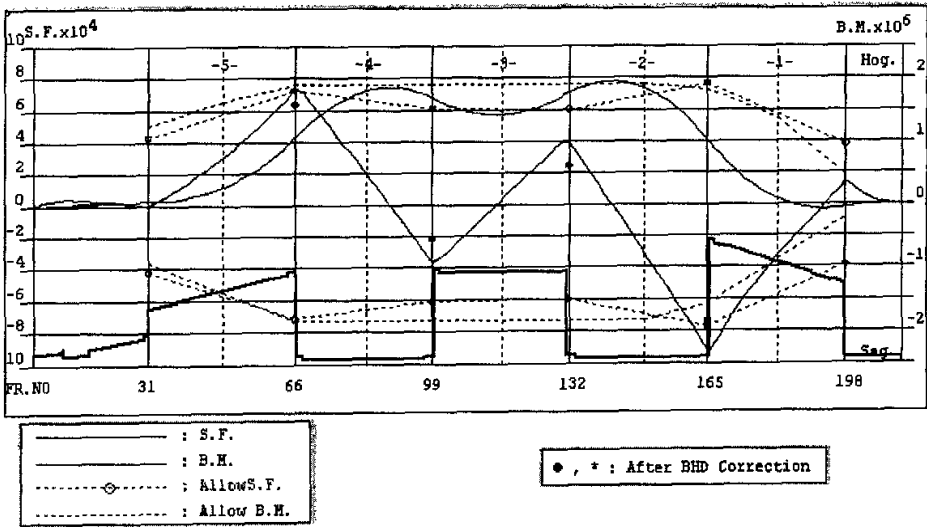
Tab.4.2 Cargo weight distribution in each hold for condition No.1

货舱号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
配货重量 (吨)	15967	0	20180	0	17218

2) 船舶强度校核

船舶首吃水为 12.13m, 尾吃水为 12.88m, 平均吃水 12.50m。对船舶在完整状态时总纵强度校核, 其中最大静水剪力百分比为 73%, 最大弯矩百分比为 72%, 船

船在完整状态时总纵强度满足要求；根据 IACS S17 要求对考虑船舶任一货舱进水后的总纵强度校核，结果发现当分别考虑 No. 2、No. 3、No. 4 及 No. 5 货舱进水时，船舶的剪力和弯矩都在许用值范围内，而当考虑 No. 1 货舱进水时，船舶最大静水弯矩百分比达到了 103%，超出了许用范围，如图 4.1，由此可以判断该工况下的总纵强度不满足 IACS URS17 要求，该装载工况是不允许的。



注：S.F. — 实际静水剪力；B.M. — 实际静水弯矩；Allow S.F. — 允许静水剪力；
 Allow B.M. — 允许静水弯矩；After BHD Correction — 经横舱壁修正后。

图 4.1 No. 1 货舱进水时剪力、弯矩曲线

Fig.4.1 Curves of shear force and bending moment when No.1 hold flooded

如对 No. 1、No. 3、No. 5 货舱进行了充分平舱，货物上表面是水平的，则 No. 1、No. 3、No. 5 货舱的装货高度分别为 7.14m, 8.28m, 7.07m。应用本文 3.2.4 节开发的计算程序校核，货舱的实际载货量小于每个货舱的最大允许装货量，该装载工况满足均布载荷要求。再应用货舱及相邻两货舱载重量限额与吃水的函数关系曲线校核各货舱及相邻货舱的载重量，也在允许范围。可以判定该装载工况满足局部强度要求。

3) 改善方案

本例表明：该轮在隔舱装载密度为 3.0 t/m^3 及以上的固体散货时，该装载方案不满足总纵强度要求。笔者发现如装载密度为 2.9 t/m^3 的固体散货，该装载方案可以满足要求。可见，货物密度对考虑货舱进水后的总纵强度的影响是很大的。对于本船来说，一旦由于航次需要，隔舱装载密度为 3.0 t/m^3 及以上的固体散货时，必须根据情况减少航次货运量，重点是要减少造成危险的 No.1 货舱的装货量。

2. 工况 2

1) 船舶装载状态：

船上装载密度为 1.5 t/m^3 的矿石达到满载，采取各舱不均匀装载方案，各舱配货重量如表 4.3，所有油舱装至舱容的 90%，所有淡水舱装满，压载舱全空。

表 4.3 工况 2 各舱货物重量分配

Tab.4.3 Cargo weight distribution in each hold for condition No.2

舱别	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
配货重量 (吨)	10000	6000	20000	6397	11000

2) 船舶强度校核

此时，船舶首吃水为 12.17m，尾吃水为 12.85m，平均吃水 12.50m。经校核，船舶在完整状态时，最大静水剪力百分比为 80%，最大静水弯矩百分比为 68%。分别考虑船舶任一货舱进水校核总纵强度，结果发现当考虑 No. 3 货舱进水时，船舶最大静水剪力百分比达到了 101%，超出了许用范围；当考虑 No. 4 货舱进水时，船舶最大静水剪力百分比达到了 107%，最大静水弯矩百分比达到了 113%，剪力和弯矩均超出了许用范围。经充分平舱，舱底单位面积上负荷量小于允许值；货舱的装货量也小于装载手册中提供的货舱设计的最大允许装载量；但 No. 2 & 3 货舱段和 No. 3 & 4 货舱段的装货量均超出了允许值，如图 4.2。因此，本工况中，船舶的总纵强度和局部强度均不满足要求。

3) 改善方案

本工况是船舶满载时各货舱重量分布较不均匀的情况，在航运实践中，如果船舶在同一航次有装载不同种类的货物需求或其它特别航次需求时，类似该工况可能会出现。对于航海人员，需要根据实际情况在做配载计划时注意校核，尽量

遵循装载手册建议的装载方案，努力做到各舱均匀装载或采取各舱装载方案，如果确实无法完成预定的航次任务，必须及时向承租人或船东汇报；对于承租人或船东，应充分考虑船舶的实际承载能力，将船舶的安全放在首要位置。

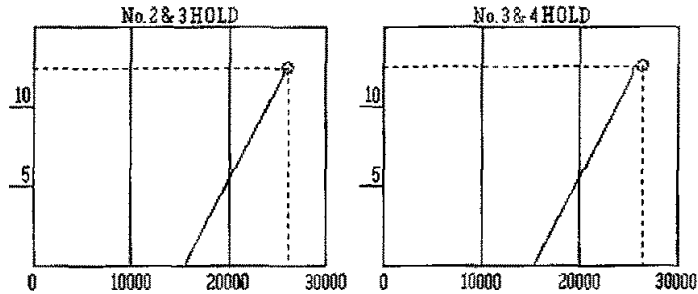


图 4.2 No. 2 & 3 和 No. 3& 4 货舱段的装载量校核曲线

Fig.4.2 Curves of maximum allowable and minimum required cargo mass as function of draught for hold No.2 & 3 and No.3&4

3. 工况 3

1) 船舶装载状态

两货舱装载，其中一舱超载：当由于航次需要两货舱装货后需到其他港口加载时，此时船舶吃水较小，每一货舱的最大允许载货量也较小，货物集中在两个货舱内，造成货舱载重量超过限制值。如本工况，货物密度为 $1.5\text{t}/\text{m}^3$ ，各货舱货物重量分配如表4.4，所有压载舱为空舱，油舱装至舱容的90%，淡水舱全部装满。

表 4.4 工况 3 各货舱货物重量分配

Tab.4.4 Cargo weight distribution in each hold for condition No.3

舱号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
货舱货量 (吨)	0	11000	0	6000	0

2) 船舶强度校核

此时船舶首吃水 $d_F=4.90\text{m}$ ，尾吃水 $d_A=6.74\text{m}$ 。完整状态时，最大静水剪力百分比53%，最大静水弯矩百分比37%；考虑任一货舱进水时，剪力和弯矩也在允许范围。该工况下，船舶浮态没有任何问题，总纵强度也处在较为理想的状态，No. 2

和No. 4舱的装货量也小于装载手册中提供的货舱设计的最大允许装载量，均布载荷的实际负荷量也小于允许负荷量。但第No. 2舱的装载量超过了该吃水时的最大许用装载量，如图4.3所示。可以判定船舶局部强度不满足要求。

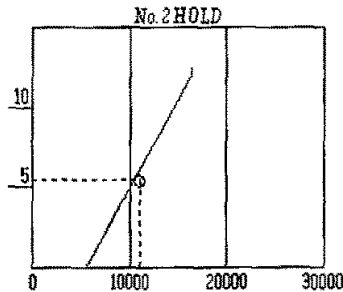


图4.3 No. 2货舱装载量校核曲线

Fig.4.3 Curves of maximum allowable and minimum required cargo mass for hold No.2

3) 改善方案:

在 No.1 和 No.5 压载舱分别注入 200 吨和 600 吨压载水，增大 No.2 货舱的吃水，可以使 No.2 舱的装载量处在允许范围内。

4. 工况 4

1) 船舶装载状态

表4.5 工况4各货舱货物重量分配

Tab.4.5 Cargo weight distribution in each hold for condition No.4

货舱号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
货舱货量 (吨)	4000	9000	0	12000	0

三个货舱装载，其中一货舱为指定的空舱，指定空舱的装货量超过了该吃水时最大允许装载量。如本工况，货物密度为 $1.5\text{t}/\text{m}^3$ ，各货舱货物重量分配如表4.5，所有压载舱为空舱，油舱装至舱容的90%，淡水舱全部装满。

2) 船舶强度校核

此时船舶首吃水 $d_f=6.72\text{m}$ ，尾吃水 $d_a=7.98\text{m}$ 。最大静水剪力百分比为44%，最

大静水弯矩百分比为26%；考虑任一货舱进水时，剪力和弯矩也在允许范围。该工况下，船舶浮态没有问题，总纵强度也较为理想，No. 1、No. 2和No. 4舱的装货量也小于装载手册中提供的货舱设计的最大允许装载量，均布载荷的实际负荷量也小于允许负荷量。但第No. 4舱的装载量超过了该吃水时的最大许用装载量，如图4.4所示。

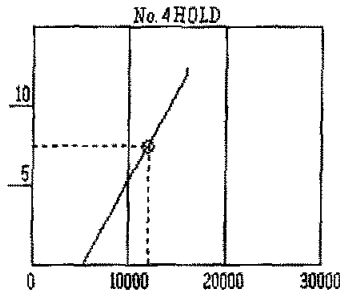


图4.4 No. 4货舱装载量校核曲线

Fig.4.3 Curves of maximum allowable and minimum required cargo mass for hold No.4

3) 改善方案

在No. 3压载舱注入700吨压载水，增大No. 4货舱处的吃水，可以使No. 4舱的装载量处在允许范围内。

5. 工况 5

1) 船舶装载状态

三个货舱装载，其中有两货舱相邻，相邻两舱的装货量超过了该吃水时最大允许装载量。如本工况，货物密度为 1.5t/m^3 ，各货舱货物重量分配如表4.6，所有压载舱为空舱，油舱装至舱容的90%，淡水舱全部装满。

表 4.6 工况 5 各货舱货物重量分配

Tab.4.6 Cargo weight distribution in each hold for condition No.5

舱号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
货舱货量 (吨)	8000	0	12000	11000	0

2) 船舶强度校核

此时船舶首吃水 $d_F=8.11\text{m}$ ，尾吃水 $d_A=8.83\text{m}$ 。最大静水剪力百分比为67%，最大静水弯矩百分比为59%；考虑任一货舱进水时，剪力和弯矩也在允许范围。该工况，No. 1、No. 3和No. 4舱的装货量也小于装载手册中提供的货舱设计的最大允许装载量，均布载荷实际负荷量也小于允许负荷量。但No. 3和第No. 4相邻两货舱的装载量之和超过了该吃水时要求的货舱段的最大许用装载量，如图4.5所示。

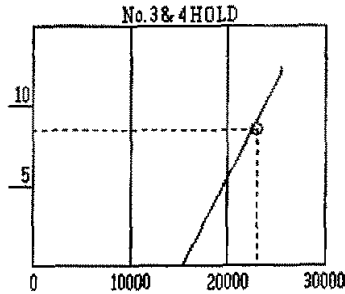


图4.5 No. 3&4相邻两货舱的装载量校核曲线

Fig.4.5 Curves of maximum allowable and minimum required cargo mass for hold No.3&4

3) 改善方案

在No. 2和No. 5压载舱分别注入50%和100%的压载水，增大No. 3和No. 4货舱处的吃水，可以使No. 3和第No. 4相邻两货舱的装载量处在允许范围内。

6. 工况 6

1) 船舶装载状态

假定装货前，各压载舱均装满压载水，如果先装No. 2货舱，同时排No.2压载舱压载水，则会出现较大的首倾，有时需要先排首尖舱和No. 1压载舱，本工况为船舶在港口装载过程中，先装No. 2货舱且一次性装足（达到均匀装载时的装货量11271吨），货物密度为 $1.5\text{t}/\text{m}^3$ ，各货舱及压载水舱载荷配置如表4.7。

2) 船舶强度校核

此时船舶首吃水 $d_F=6.47\text{m}$ ，尾吃水 $d_A=7.69\text{m}$ 。最大静水剪力百分比为61%，最大静水弯矩百分比为40%；考虑任一货舱进水时，剪力和弯矩也在允许范围。该工

况下，No. 2货舱的装货量小于装载手册中提供的货舱最大设计允许装载量，均布载荷的实际负荷量也小于允许负荷量。但No. 2货舱的装载量超过了该吃水时要求的港内最大许用装载量，如图4. 6所示。

表4. 7 工况6各货舱及压载水舱载荷配置

Tab.4.7 Cargo weight distribution in each hold for condition No.6

舱号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	首尖舱	尾尖舱
货舱货量(吨)	0	11271	0	0	0	/	/
压载舱水量(%)	0	100%	100%	100%	100%	0	100%

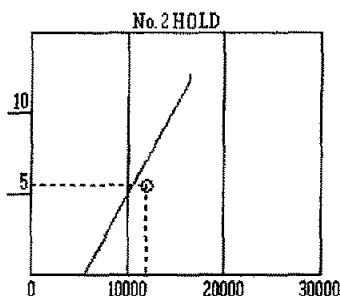


图4. 6 No. 2货舱装载量校核曲线

Fig.4.6 Curves of maximum allowable and minimum required cargo mass for hold No.2

3) 改善方案

本例中由于No. 2货舱下双层底内压载水未排出，货物也一次性装足，加上吃水又较小，故出现危险局面。建议排空首尖舱后，暂不排No. 1压载舱，而是将No. 2压载舱压载水排空即可或者减少一次性No. 2货舱的装货量，该货舱分两轮装完。

7. 工况 7

1) 船舶装载状态

在航运实践中，有些船舶由于压载管系布置限制，装载过程中，为尽可能排空压载水，经常采取的压载水排放措施是：首先各压载舱同时自排，之后再自首向尾依次排空。如装货的货舱下压载水剩余量较大，可能会出现该货舱载重量超过对应吃水时的允许载重量，如本工况，货物密度为 1.5t/m^3 ，各货舱及压载水舱

载荷配置如表4.8。

表4.8 工况7各货舱及压载水舱载荷配置

Tab.4.2 Cargo weight distribution in each hold for condition No.7

舱号	1	2	3	4	5
货舱货量 (吨)	0	11000	0	0	0
压载舱水量 (%)	0	30%	50%	50%	50%

2) 船舶强度校核

此时船舶首吃水 $d_F=5.53m$ ，尾吃水 $d_A=5.69m$ 。最大剪力百分比为56%，最大弯矩百分比为35%；考虑任一货舱进水时，剪力和弯矩也在允许范围。该工况下，船舶浮态、总纵强度没有问题，No.2货舱的装货量也小于装载手册中提供的货舱设计的最大允许装载量，均布载荷的实际负荷量也小于允许负荷量。但危险出现在No.2货舱的装载量超过了该吃水时要求的最大许用装载量，如图4.7所示。

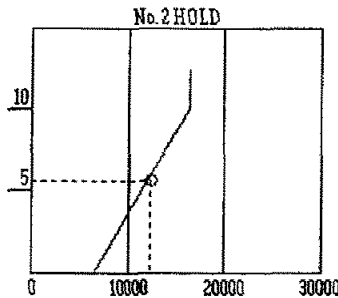


图4.7 No.2货舱装载量校核曲线

Fig.4.7 Curves of maximum allowable and minimum required cargo mass for hold No.2

3) 改善方案

(1) 采取分轮装载方案，减少一次性向一货舱的装载量，如本例，只要此时No.2货舱装货量少于10800吨即可。

(2) 减少No.1压载舱的排放量，只要在No.1压载舱暂时保留320吨压载水即可。

4.3 危险工况分析及应对方案

以上所列七种危险工况都是散货船在营运中可能或经常发生的，工况1为隔舱装载高密度固体散货达到满载时，船舶不满足考虑任一货舱进水时的总纵强度要求；工况2为船舶装载较高密度固体散货达到满载并且货物在各舱分布较不均匀，船舶不满足考虑任一货舱进水时的总纵强度要求，同时不满足相邻货舱装载量限额的要求；工况3、4、5、6、7五种装载工况为船舶在海上或港口装货过程中部分装载状态，某一货舱或相邻货舱的载货量超出了作为吃水函数的一货舱或相邻货舱载重量限额的要求。

如果按照传统的散货船强度校核方法，仅校核完整状态时的总纵强度、货舱设计的最大允许装货量限制和单位面积上的允许负荷量要求，而不考虑任一货舱进水状态的总纵强度要求和作为吃水函数的货舱载重量限额的局部强度要求，以上七种危险工况都将认为是安全的。但这是与国际船级社协会为保证散货船安全推出的统一要求S17和S25相违背的，造成看似安全的装载工况实际上是存在安全隐患的。

以上仅列举了若干危险工况中的具有代表性的七种工况，通过对以上七种忽视IACS URS17和S25关于强度控制的要求时易发生的危险工况分析，可以发现：

1. 如果装运装载手册未提供范例的高密度固体散货，即使按装载手册建议的各货舱货物分配方案配载，虽然完整状态时的总纵强度在允许范围，但考虑任一货舱进水时的总纵强度可能不满足要求。如果装运此类货物最佳调整方案是减少航次货运量，船舶将不能达到满载，对于承租人或船东来说只有牺牲部分运费损失来换取船舶的安全；

2. 在航运实践中，如果在同一航次有装载不同种类货物的需要或由于实践中航次任务的其他需要，会出现船舶满载状态但各货舱重量分布较不均匀的工况。该装载工况并非装载手册建议的工况，在设计时一般也未曾考虑，所以当考虑任一货舱进水时的总纵强度和作为吃水函数的货舱载重量限额的局部强度要求很容易不满足要求。对于航海人员，需要根据实际情况在做配载计划时注意校核，尽量遵循装载手册建议的装载方案采取各舱均匀装载或隔舱装载方式，如果船舶确实无法完成预定的航次任务，须及时向承租人或船东汇报；对于承租人或船东，

应充分考虑船舶的实际承载能力，将船舶的安全摆在首要位置；

3. 相邻两货舱的最大载重量极限并不是装载手册提供的两个货舱最大装货量极限之和，而是远小于两货舱最大装货量之和的，传统的局部强度校核也未考虑相邻货舱装载量的限制。船舶满载状态，各舱不均匀分配货物时，相邻货舱的载重量之和很容易超出两个货舱最大装重量极限，所以航海人员应尽可能遵循装载手册建议的装载方案；

4. 特别要注意双层底内油水重量和货物重量之和是作用在船底的重量载荷，装载手册中提供的货舱最大允许装载量是假定双层底为空舱时的值，如果双层底内不为空时，根据 IACS URS25, 货舱的载重量极限是要扣除双层底内载荷重量的，传统的校核局部强度方法是只考虑货舱内的货物重量，而忽略双层底内载荷重量；

5. 某一货舱载重量超出作为吃水函数的最大载重量限额的危险工况多发生在船舶部分装载状态，并且指定空舱的载重量超过对应吃水的装载量极限的情况更多，主要原因是该装载状态船舶吃水较小，并且指定空舱的承载能力较低。所以船舶部分装载，特别是多港口装卸货时，非装货舱下双层底内的压载水应适当保留，使载货的货舱保证足够的吃水；

6. 在装载过程中，若装货速度过快，对应货舱下双层底内的压载水未及时排出，很容易会出现该货舱超过对应吃水时的装载量的限制；或若装货速度较慢或因其它原因而耽搁装货，各压载舱内的压载水排放量较大，造成船舶吃水较小，货舱的最大允许装货量装载量也较小，容易出现货舱载重量超出限额的情况。因此，在做装卸货计划时，考虑船舶各剖面剪力和弯矩的同时应兼顾各货舱的在不同吃水时装载量的限额，充分考虑装卸货速度和压载水排放/注入的速度。在装卸作业过程中，船员应注意监督，严格执行装卸计划；

7. 传统的校核局部强度方法是只考虑货舱的最大装货量限制，而不考虑最小需要载货量的要求。当船舶达到满载吃水或接近满载吃水时，指定的重货舱一般不能空舱，应达到其最小载货量的要求，另外在卸货时，一般不能一开始就将重货舱内的货物卸空；

8. 隔舱装载高密度货物并接近满载时，各舱装载量接近其最大允许值，所以在充分注意平舱的同时，应尽可能排尽压载水，装货过程中，严格控制各舱装货

数量，减小误差，因为此时即使剩余很少量的压载水或出现很小的误差就可能会造成货舱超载；

9. 对于货舱的载重量超出作为吃水函数的货舱最大载重量的工况可以通过调整压载水来增大危险货舱（货舱段）的吃水，使货舱最大载重量限额增大，达到满足货舱局部强度要求。

以上阐明了国际船级社协会新要求S17和S25的实施给航运中散货船强度控制带来的影响，总结出忽视IACS URS17和S25中关于散货船强度控制的要求时一些容易出现的危险工况，并分析了这些危险工况的特点、产生的主要原因及应对方案，提出了航运界有关人士在散货船强度控制过程中应当注意的问题，并给出了应对常见问题的方案和建议。

综上所述，为保证散货船结构强度的安全，对于航海人员，必须重视国际船级社协会新要求对散货船强度控制的影响，严格按照新要求进行强度控制；对于承租人及船东不能一味追求经济效益而忽视船舶的安全，因为保证人命及财产的安全才是首要的。虽然船舶结构强度具有一定的储备，但也不能因一两次未按要求控制船舶强度未发生事故而忽视对船体结构强度的控制，因为这种危险是潜在的，它将会为以后发生重大事故埋下隐患。

第5章 总结与展望

5.1 总结

本文结合笔者在航海实践中发现的容易被忽视的散货船强度控制问题,对散货船的总纵强度和局部强度的校核方法和控制方案展开研究。重点研究了受航运界普遍关注的 IACS URS17 和 S25 提出的新要求对营运中散货船的强度控制产生的巨大影响及航运中需要采取的强度控制方案。本文所做的工作如下:

1. 本文在传统的总纵强度计算方法基础上,根据 IACS UR S17 有关单船壳散货船考虑任一货舱进水后的船体梁的总纵强度要求,研究了考虑任一货舱进水后船舶总纵强度的校核方法,在此基础上,根据 ABS 船级社规范,应用剖面模数衡量,提出了方便航海人员应用的计算船舶破损后剩余强度的简化方法;

2. 当装载高密度固体散货时,货物上表面有高有低,为保证舱底单位面积负荷不超过允许值,致使货舱允许装载量远小于设计的最大允许载货量,因此进行充分平舱十分必要,本文根据货物休止角和密度建立了货舱最大允许载货量近似计算方程,并编制了方便航海人员使用的计算程序;

3. 船底板架的计算载荷是用双层底上净载荷表示的,本文根据 IACS URS25 中增加的散货船局部强度的校核要求,重点研究了每一货舱及相邻两货舱的载货量限额与吃水的函数关系的确定方法和该函数关系在实践中的应用方法,采用 MICROSOFT EXCEL 编制了适用 BC-A 协调标志散货船确定作为吃水函数的每一货舱及相邻两货舱装货量极限的计算程序,并绘制了货舱吃水与货舱载货量限额的函数关系曲线,供航海人员在生产实践中使用;

4. 通过实船计算,结合散货船在营运中可能或经常发生的七种危险工况分析,发现国际新规则 IACS UR S17 和 S25 的实施给航运中散货船强度控制带来了如下影响:新规则提出了船舶满足任一货舱进水后总纵强度要求和货舱载货量满足作为吃水函数的载货量限额的局部强度要求;新规则中增加了货舱最小装货量要求,并对任意相邻货舱的装货量作出了限制;出现了许多按照传统的船舶强度校核方法认为安全的,但根据新规则校核,却不一定安全的工况。因此新规则生效后,航运界人士在进行散货船强度控制时需要注意以下几点:

1) 装载高密度固体散货达到满载时, 容易造成船舶不满足考虑任一货舱进水的总纵强度要求, 所以在航运生产实践中, 应注意货物的密度不能超过船舶所能承受的最大值或根据实际情况减少航次货运量;

2) 货物配载应尽可能遵循装载手册推荐方案, 除装载手册推荐的方案, 各舱严重不均匀装载工况尽量避免;

3) 相邻货舱载货量限额远小于每个货舱的最大允许载货量之和;

4) 满载时, 船舶指定重货舱一般不能空舱;

5) 部分装载时, 尽量减少指定空舱的装载量, 并适当保留未装货或装货较少的货舱下双层底内的压载水;

6) 货舱的重量载荷包括货物和双层底内油水的重量之和, 货舱装货量限额在数值上等于载重量限额扣除双层底内油水重量;

7) 隔舱装载时, 尽可能减小实际装载量与计划装载量的误差;

8) 对于货舱的载重量超出作为吃水函数的货舱最大载重量的工况可以通过调整压载水来增大危险货舱(货舱段)的吃水, 使货舱最大载重量限额增加, 达到满足货舱局部强度要求, 实践中航海人员可以利用本文 3.4.6 中提供的关于 P_1 的一次多项式, 在保证船舶浮态、稳性及总纵强度的前提下根据船舶实际情况确定调整方案。

5.2 展望

由于篇幅及时间有限, 本文仅就受航运界普遍关注的新规则 IACS UR S17 和 S25 进行了较深入的研究, 基于其它国际新规则对散货船强度控制的影响还有待进一步研究。本文议题来源于生产实践, 未拘泥于深奥理论上的阐述, 主要注重于生产实践应用。

希望以后在开发散货船装载仪时能充分考虑本文所阐述的内容, 包括考虑任一货舱进水后总纵强度要求、破舱后的剩余强度计算、考虑货物休止角后货舱载重量限制以及作为吃水函数的每一货舱及相邻两货舱的载货量限额要求等问题, 开发出具有完善强度计算功能的计算机装载软件。在生产实践中, 严格按照国际规则提出的新要求加强散货船强度控制, 达到延长船舶寿命、保证安全营运的目的。

参考文献

- [1]唐惠宇. 散货船装载过程优化的研究(硕士论文). 大连海事大学, 2004:1-11.
- [2]郭其顺. 世界海难事故的现状与原因分析. 中国船检, 2000(5):43-44.
- [3]徐邦祯 王建平 田佰军. 海上货物运输技术. 大连海事大学出版社, 2001.
- [4]任孔愚. 大型散货船船体损伤事故及对策研究. 中国航海, 1996(1): 26-28.
- [5]吴明. 巴拿马型散装货船结构维护. 中国船友网, 2001.
- [6]张文华. 散货船国际安全措施. 中国航海, 第43期, 2002: 36-39.
- [7] Lloyd' s Register. Marine division bulk carrier-an update. 1998:19-26.
- [8]向阳. FSA 方法在未来船舶工程和航运安全管理中的应用前景. 中国船检, 2000(6):55-56.
- [9]中国船级社. SOLAS 公约 1995 年修正案. 人民交通出版社, 2002.
- [10]李姚飞. 浅谈大中型散货船的不安全因素. 世界海运, 1995(6).
- [11]中国船级社. 综合安全评估应用指南. 人民交通出版社, 1999
- [12]张永良, 霍小军. 散货船强度控制的几个问题. 大连海事大学学报, 1999(2)
- [13]王建平. 船舶货运技术. 大连海事大学出版社, 1999:164-166
- [14]沈华, 杜嘉立, 徐邦祯. 船舶稳性与强度计算. 大连海事大学出版社, 2001.
- [15]陈桂卿, 李治平. 船舶货运. 大连海运学院出版社, 1991.
- [16]中国船级社. 钢质海船入级和建造规范. 人民交通出版社, 2002.
- [17]蒋维清. 船舶原理. 人民交通出版社, 1992:120-131.
- [18]祁恩荣, 崔维成. 船舶碰撞和搁浅后剩余强度可靠性的评估. 船舶力学. 1999, 3(5):40-46 .
- [19]Ge Wang .Assessment of a Ship' s Performance in Accidents. ABS.
- [20]Paik .The Strength and reliability of bulk carrier structures subject to age and accidental flooding. SNAME Transactions, 1998:106.
- [22] 吴兆建. 散货船破舱安全性的研究(硕士论文). 大连海事大学, 2003:30-35.
- [23]张家新, 聂武. 破损船体极限强度估算. 华东船舶工业学院学报, 1998(2).
- [24]Ge Wang. Longitudinal strength of ships with accidental damages. Marine Structure, 2002(15):119-138.

- [25]沈玉如. 船舶货运. 大连海事大学出版社, 1998.
- [26]王杰德. 船体强度与结构设计. 国防工业出版社, 1992.
- [27]盛振邦. 船舶静力学. 国防工业出版社, 1984.
- [28]中国船级社. 船体结构直接计算指南. 人民交通出版社, 2001.
- [29]中国船级社. 装载手册编制指南. 人民交通出版社, 2003.
- [30]中国船级社, 散货船结构直接计算分析指南. 人民交通出版社, 2003.
- [31]郭昌捷, 马骏. 油船配载控制与剩余强度研究. 大连理工大学学报, 1995(6):867-872.
- [32]陈有芳, 徐立. 船舶结构强度直接计算分析中应力的选取. 武汉理工大学学报, 2004(2),
Vo128:174-177.
- [33]邵文蛟. 破舱情况下船体总纵强度分析. 中国造船, 1997, (7):66-72.
- [34]郭昌捷, 张道坤, 李建军. 综合安全评估在船舶装卸过程中的应用. 大连理工大学学报,
2002(9).
- [35]关宝新. 散货船结构强度直接计算及强度标准研究(硕士论文). 武汉理工大学, 2003:
27-31.
- [36]饶南. 装载重大件情况下船体结构局部强度校核研究(硕士论文). 大连海事大学, 2000:
18-21.
- [37]郭唱捷, 周炳焕. 营运船舶总纵剩余强度评估和预报. 大连理工大学学报, 1998, VOL. 38.
- [38]周炳焕. 受损船舶剩余极限强度分析与可靠性评估(硕士论文). 大连理工大学, , 2001.
- [39]中国船级社. 新造散货船协调附加标志及对应工况校核的要求通函. 2003.
- [40]林莉. 国际新规则对散货船设计的影响. 上海造船, 2005(1):20-24.
- [41]Germanischer Lloyd. Rules for Classification and Construction Ship
Technology. June, 2005:Section 4, 5, 23.
- [42]IACS. URS25 Harmonised Notations and Corresponding Design Loading Conditions for
Bulk Carriers, 2002.
- [43]李荣辉, 沈华. 散货船货舱结构可靠性模型. 航海技术与航海教育论文集, 2003:98-101.
- [44]沈华, 李荣辉. 综合安全评估法在船舶配载中的应用. 大连海事大学学报, 2003 Vol. 29
No. 4:28-30
- [45]李荣辉, 孔祥生. 散货船货舱结构风险评估. 航海技术与航海教育论文集, 2004:50-54.

- [46]张国栋, 李朝晖. 船舶破损后外载荷与船体极限弯矩. 中国造船, 1997, (3).
- [47]Paik. Residual Strength Assessment of Ships after Collision and Grounding. Marine Technology, 1998, 35(1):38-54.
- [48]张少雄. 船舶结构强度直接计算中板单元应力的取法. 船舶工程, 2004 (3): 174-177.
- [49]中国船级社. 海船法定检验技术规则. 人民交通出版社, 1996.
- [50]郑经略, 史洪源. 船艺. 大连海事大学出版社. 1993.
- [51]杨靖海. 影响现役散货船总纵强度的破损模式的研究. 中国造船, 2001(6).
- [52]Weicheng Cui. Strength of ship plates under combined loading. Marine Structure(15), 2002:75-97.
- [53]Tetsuya Yao. Hull girder strength. Marine Structure(16), 2003:1-13.
- [54]Chuang Fang, Purnendu K. Das. Survivability and reliability of damaged ships after collision and grounding. OCEAN ENGINEER(32), 2005:293-307.

附录 关于 IACS UR S25 的 CCS 通函内容节选

新造散货船协调附加标志及对应工况校核的要求

1. 前言

1.1. 为了提高散装货船的安全性，统一各船级社授予散货船的附加标志，国际船级社协会(IACS)通过了统一要求 S25 “散货船协调附加标志极其对应设计载荷工况” [Harmonised Notation and Corresponding Design Loading Conditions for Bulk Carriers(Rev.1/2003)]。要求在 IACS 成员中，新造散装货船应授予协调附加标志，并根据相应的附加标志确定设计装载工况的校核要求，从而使散装货船的载货能力更加透明。

1.2. 此项统一要求不妨碍装载手册中包含按照 IACS 其他的相应要求提交计算的设计装载工况，而且不能以任何方式替代船舶必需的装载手册和装载仪。

1.3. 实际操作中装载工况可以与装载手册中的设计装载工况不同，但总纵强度和局部强度应不超过船上装载手册和装载仪规定的限制，并且满足适用的稳性要求。

1.4. 此项统一要求分为两部分：新造散装货船的协调附加标志，与协调附加标志相对应的设计装载工况。

2. 适用范围

本要求适用于船长 150m 及以上、并于 2003 年 7 月 1 日及以后签订建造合同的单舷侧结构和双舷侧结构的国际航行散装货船。

3. 定义和解释

3.1. 散货船协调附加标志

3.1.1. BC-A: 满足以下条件的船舶可以授予 BC-A 附加标志:

- 设计装载货物密度为 $1.0\text{t}/\text{m}^3$ 及以上的干散货物，和
- 在最大吃水工况中可有指定空舱，并
- 其载荷工况包括 BC-B 的要求。

3.1.2. BC-B: 满足以下条件的船舶可以授予 BC-B 附加标志:

- 设计装载货物密度为 $1.0\text{t}/\text{m}^3$ 及以上的干散货物，和
- 所有舱装均装有货物（不允许空舱），并
- 其载荷工况包括 BC-C 的要求。

3.1.3. BC-C: 满足以下条件的船舶可以授予 BC-C 附加标志:

- 适用于设计装载货物密度小于 $1.0\text{t}/\text{m}^3$ 干散货物。

3.2. 其他附加标志

3.2.1. 最大货物密度 (t/m^3) {maximum cargo density(in tonnes/ m^3) }附加标志: 当设计的最大货物密度小于 $3.0\text{t}/\text{m}^3$ 时, 应给予此项限制标志, 并在括号内标明允许装载的最大货物密度, 该标志仅适用于 BC-A 和 BC-B 协调标志。

3.2.2. 无多港口装/卸货物 {no MP}附加标志: 当散装货船设计不能按 5.3 中对多港口装/卸货物提出的要求时。应给予此项限制标志, 该标志适用于所有散货船标志 (BC-A、BC-B、BC-C)。

3.2.3. 空舱标志 {allowed combination of specified empty holds}: 当散货船的设计允许空舱时, 应给予该标志, 并且将空舱的组合要求填写在括号内, 该标志只适用于 BC-A 协调标志。

3.3. 一般定义

3.3.1. “最大吃水”为夏季载重线吃水。

3.3.2. “装载率”为货舱中货物质量除以所占货舱舱容的比值。

4. 设计装载工况的一般要求

4.1. BC-C 附加标志应包含的工况:

4.1.1. 均匀装载

- 吃水: 最大吃水
- 装载状态: 100%装满至舱口
- 货物密度: 对应于所有货舱装载的货物密度相同
- 压载舱: 空舱。

4.2. BC-B 附加标志应包含的工况:

4.2.1. 4.1. 的工况。

4.2.2. 均匀装载

- 吃水: 最大吃水
- 装载状态: 各舱采用相同的装载率 (货物重量/货舱容积)
- 货物密度: $3.0\text{t}/\text{m}^3$ 。但是, 如果船舶在设计工况下, 货物密度小于

3.0t/m³，则用设计允许的最大货物密度，并增加最大货物密度附加标志

- 压载舱：空舱。

4.3. BC-A 附加标志应包含的工况：

4.3.1. 4.2 的工况。

4.3.2. 指定空舱组装载工况：

- 空舱：根据 3.2.3 给出的附加标志指定空舱

- 吃水：最大吃水

- 装载状态：其它货舱采用相同的装载率（货物重量/货舱容积）

- 货物密度：3.0t/m³。但是，如果船舶在设计工况下，货物密度小于 3.0t/m³，则用设计允许的最大货物密度，并增加最大货物密度附加标志

4.4. 压载工况（适用于所有协调附加标志）

4.4.2. 压载舱布置要求：

4.4.2.1. 一般压载工况：

4.4.2.2. 重压载工况：

4.4.3. 散装货船压载工况的强度要求

4.5. 上述 4.1、4.2、4.3 和 4.4 中所列工况应分为出港和到港两种状态，如无另外说明，出港和到港状态应取为：

4.5.1. 出港状态：燃油舱中的燃油不少于 95%，其余消耗品 100%

4.5.2. 到港状态：所有消耗品 10%

5. 设计装载工况货舱局部强度要求

5.1. 定义：

一个货舱或两个相邻货舱的最大允许载货量和要求的最小载货量，与双层底上的净载荷有关。双层底上的净载荷是吃水、货舱载货量、双层底舱中燃油和压载水质量的函数。为了更清楚地说明下列的工况，定义下面三个参数。

5.1.1. M_H ：最大吃水时，均匀装载工况下，货舱的实际载货量。

5.1.2. M_{Full} ：均匀装载工况下，货物取虚拟密度（虚拟密度=货舱载货量/货舱容积，最小取 1.0t/m³），装至舱口盖围板顶部时，货舱的载货量。 M_{Full} 应不小于 M_H 。

- 5.1.3. M_{HD} : 最大吃水时, 在指定空舱的设计装载工况下, 货舱的最大允许载货量。
- 5.2. 所有附加标志要求 (BC-A、BC-B 和 BC-C) 对每一种类的货舱, 均应对以下载荷状态进行校核:
- 5.2.1. 最大吃水的状态下, 货舱下双层底内燃油舱(如设有时)100%满舱, 双层底内压载舱空舱时, 该货舱应能装 M_{Full} 的货物。
- 5.2.2. 最大吃水的状态下, 货舱下双层底内为空舱时, 该货舱应能装至少 $50\%M_H$ 的货物。
- 5.2.3. 最大压载吃水时, 货舱下双层底内为空舱时, 该货舱也为空舱。
- 5.3. 对没有授予 {no MP} 附加标志 (无多港口装/卸货物) 船舶的要求
- 5.3.1. 67%最大吃水时, 任一货舱下双层底内燃油舱(如设有时)100%满舱, 双层底内压载舱空舱时, 该货舱应能装 M_{Full} 的货物。
- 5.3.2. 83%最大吃水时, 任一货舱下双层底内所有舱空舱时, 该货舱应能空舱。
- 5.3.3. 67%最大吃水时, 任何两相邻货舱下双层底内燃油舱 100%满舱(如设有), 双层底内压载舱空舱时, 该两货舱均应能装 M_{Full} 的货物。如果该相邻货舱并非装货而是装满压载水, 该货舱也应能装 M_{Full} 的货物。
- 5.3.4. 75%最大吃水时, 任何两相邻货舱下双层底内所有舱空舱时, 该两货舱应能空舱。
- 5.4. BC-A 附加标志的补充要求
- 5.4.1. 最大吃水时, 设计作为指定空舱的货舱, 当货舱下双层底内所有舱空舱时, 该货舱应能空舱。
- 5.4.2. 最大吃水时, 设计装载重货的货舱, 当货舱下双层底内燃油舱(如设有时)100%满舱, 双层底内压载舱空舱时, 该货舱应能装 $M_{HD}+10\%M_H$ 的货物。但是在实际操作中, 该货舱的最大允许载货量应限制为 M_{HD} 。
- 5.4.3. 最大吃水时, 如果任意两相邻货舱按设计装载工况装货, 与它们相邻的货舱为空舱, 当货舱下双层底内燃油舱(如设有时)100%满舱, 双层底内压载舱空舱时, 该两相邻货舱均应能装该设计工况中规定的最大载货量 $M_{HD}+10\%M_H$ 。但是在实际操作中, 最大允许载货量应限制为该设计工况中规定的最大载货量 M_{HD} 。

5.5. 可装压载水货舱的补充要求

5.5.1. 在任何重压载吃水时，设计装压载水的货舱，当货舱下双层底内所有舱100%满舱时，该货舱应能装满压载水至舱口。当该货舱装满压载水而相邻的顶边舱、底边舱、双层底舱空舱时，货舱结构应保证有足够的强度。

5.6. 港内装/卸货时的补充要求

5.6.1. 港内，67%最大吃水时，任一货舱应能装载航行状态下的最大允许装货量。

5.6.2. 港内，67%最大吃水时，两相邻货舱下双层底内燃油舱(如设有时)100%满舱，双层底内压载舱空舱时，该两货舱均应能装 M_{Full} 货物。

5.6.3. 港内装/卸货过程中吃水减少状态下，货舱内的最大允许载货量可以适当增，增加量为航行状态下最大吃水时最大允许载货量的15%，但最大允许载货量仍应不超过航行状态下最大吃水时的允许载货量。最小载货量也可以适当减少，减少量为航行状态下最大吃水时最大允许载货量的15%。

5.7. 载货量曲线

5.7.1. 基于以上所列局部强度校核工况，一个货舱和两相邻货舱的载货量曲线应编入装载手册和装载仪，表明航行状态和港内装/卸货状态下，货舱的最大允许载货量和最小载货量与吃水的函数关系（见 CCS 2001 版《钢规》第二篇第八章第七节）。

5.7.2. 除本通函所列装载工况外的其他吃水工况中，最大允许载货量和要求的最小载货量应按作用在船底浮力变化进行调整。浮力的变化应根据吃水处水线面面积进行计算。

攻读学位期间公开发表的论文

- [1] 李荣辉 沈华, 散货船货舱结构可靠性模型, 航海技术与航海教育论文集 (2003), 98~101, 2003年10月
- [2] 沈华 李荣辉, 综合安全评估法在船舶配载中的应用, 大连海事大学学报 Vol. 29 No. 4, 28~30, 2003年11月
- [3] 李荣辉 孔祥生, 散货船货舱结构风险评估, 航海技术与航海教育论文集 (2004), 50~54, 2004年11月

致 谢

本文是在沈华教授的精心指导下完成的。值此论文完成之际，谨向恩师表示最诚挚的感谢。在论文进行过程中，沈老师给予了谆谆教诲、热情鼓励与大力支持，从论文的研究方向、研究内容、研究思路等方面的指引到最后论文的修改都倾注了导师的心血。沈老师广博的知识、严谨的治学态度和实事求是的科研精神、犀利的洞察力、谦逊的为人使我在知识能力与为人的道理上受益匪浅。

感谢航海学院货运教研室徐邦祯教授和田佰军副教授，感谢他们在论文选题与写作过程中给予的指点与关怀。感谢王建平教授、姜华副教授、孔祥生讲师及货运教研室的其他各位老师和船艺教研室的史国友、朱金善老师在写作过程中给予的指点。特别感谢杜嘉立副教授从论文的选题到论文修改直至定稿整个过程中给予的无私指导与关怀。

感谢“BRUNO SALAMON”轮船长—于连春先生及其他船员，在我船上任职及调研工作期间给予的支持和配合。

感谢“BIG GLORY”轮船长—沈江先生和“JINLI”轮大副—徐兆林先生为本文提供的船舶资料。

感谢我的父母及家人，是他们的关心、理解与支持，他们给了我学习的动力，使我能够安心于工作和学习，也使本文的工作得以顺利的完成。

感谢所有曾经关心和帮助过我的老师、同学和朋友。

研究生履历

姓 名	李荣辉
性 别	男
出生日期	1976年8月17日
获学士学位专业及门类	载运工具运用工程 工学
获学士学位单位	大连海事大学
通信地址	大连海事大学航海学院
邮政编码	116026
电子邮箱	huoyunjys@yahoo.com.cn

作者: 李荣辉
学位授予单位: 大连海事大学

参考文献(53条)

1. 唐惠宇 [散货船装载过程优化的研究](#)[学位论文]硕士 2004
2. 郭其顺 [世界海难事故的现状与原因分析](#)[期刊论文]-[中国船检](#) 2000(3)
3. 徐邦祯, 王建平, 田佰军 [海上货物运输技术](#) 2001
4. 任孔愚 [大型散货船船体损伤事故及对策研究](#) 1996(01)
5. 吴明 [巴拿马型散装货船结构维护](#) 2001
6. 张文华 [散货船国际安全措施](#) 2002(43)
7. Lloyd' s Register [Marine division bulk carrier-an update](#) 1998
8. 向阳, 朱永峨, 陈国权, 赖宏宇 [FSA方法在未来船舶工程和航运安全管理中的应用前景](#)[期刊论文]-[中国船检](#) 2000(1)
9. 中国船级社 [SOLAS公约1995年修正案](#) 2002
10. 李姚飞 [浅谈大中型散货船的不安全因素](#) 1995(06)
11. 中国船级社 [综合安全评估应用指南](#) 1999
12. 张永良, 霍小军 [散货船强度控制的几个问题](#)[期刊论文]-[大连海事大学学报](#) 1999(2)
13. 王建平 [船舶货运技术](#) 1999
14. 沈华, 杜嘉立, 徐邦祯 [船舶稳性与强度计算](#) 2001
15. 陈桂卿, 李治平 [船舶货运](#) 1991
16. 中国船级社 [钢质海船入级和建造规范](#) 2002
17. 蒋维清 [船舶原理](#) 1992
18. 祁恩荣, 崔维成, 彭兴宁, 徐向东 [船舶碰撞和搁浅后剩余强度可靠性评估](#)[期刊论文]-[船舶力学](#) 1999(5)
19. Ge Wang [Assessment of a Ship' s Performance in Accidents](#)
20. Paik [The Strength and reliability of bulk carrier structures subject to age and accidental flooding](#) 1998
21. 吴兆建 [散货船破舱安全性的研究](#) 2003
22. 张家新, 聂武 [破损船体极限强度估算](#) 1998(02)
23. Ge Wang [Longitudinal strength of ships with accidental damages](#) 2002(15)
24. 沈玉如 [船舶货运](#) 1998
25. 王杰德, 杨永谦 [船体强度与结构设计](#) 1992
26. 盛振邦, 杨尚荣, 陈雪深 [船舶静力学](#) 1984
27. 中国船级社 [船体结构直接计算指南](#) 2001
28. 中国船级社 [装载手册编制指南](#) 2003
29. 中国船级社 [散货船结构直接计算分析指南](#) 2003
30. 郭昌捷, 马骏 [油船配载控制与剩余强度研究](#) 1995(06)
31. 陈有芳, 徐立 [船舶结构强度直接计算分析中应力的选取](#) 2004(02)
32. 邵文蛟 [破舱情况下船体总纵强度分析](#)[期刊论文]-[中国造船](#) 1997(1)

33. 郭昌捷, 张道坤, 李建军. [综合安全评估在船舶装卸过程中的应用](#) 2002(09)
34. 关宝新. [散货船结构强度直接计算及强度标准研究](#)[学位论文] 硕士 2003
35. 饶南. [装载重大件情况下船体结构局部强度校核研究](#)[学位论文] 硕士 2000
36. 郭唱捷, 周炳煊. [营运船舶总纵剩余强度评估和预报](#) 1998
37. 周炳煊. [受损船体剩余极限强度分析与可靠性评估](#)[学位论文] 硕士 2001
38. 中国船级社. [新造散货船协调附加标志及对应工况校核的要求通函](#) 2003
39. 林莉. [国际新规则对散货船设计的影响](#)[期刊论文]-[上海造船](#) 2005(1)
40. [Germanischer Lloyd Rules for Classification and Construction Ship Technology](#) 2005
41. [IACS URS25 Harmonised Notations and Corresponding Design Loading Conditions for Bulk Carriers](#) 2002
42. 李荣辉, 沈华. [散货船货舱结构可靠性模型](#) 2003
43. 沈华, 李荣辉. [综合安全评估法在船舶配载中的应用](#)[期刊论文]-[大连海事大学学报](#) 2003(4)
44. 李荣辉, 孔祥生. [散货船货舱结构风险评估](#) 2004
45. 张国栋, 李朝晖. [船体破损后外载荷与船体极限弯矩](#)[期刊论文]-[中国造船](#) 1997(3)
46. Paik. [Residual Strength Assessment of Ships after Collision and Grounding](#) 1998(01)
47. 张少雄, 李雪良, 陈有芳. [船舶结构强度直接计算中板单元应力的取法](#)[期刊论文]-[船舶工程](#) 2004(3)
48. 中国船级社. [海船法定检验技术规则](#) 1996
49. 郑经略, 史洪源. [船艺](#) 1993
50. 杨靖海. [影响现役散货船总纵强度的破损模式的研究](#) 2001(06)
51. Weicheng Cui. [Strength of ship plates under combined loading](#) 2002(15)
52. Tetsuya Yao. [Hull girder strength](#) 2003(16)
53. Chuang Fang, Purnendu K. [Survivability and reliability of damaged ships after collision and grounding](#) 2005(32)

相似文献(10条)

1. 期刊论文 徐建豪, 张颖, Xu Jianhao, Zhang Ying. [大型散货船安全营运浅析](#) -[天津航海](#)2008, ""(4)
 文章针对大型散货船舶的特点, 特别是对大型散货船的沿岸航线设计, 船体强度等方面进行了深入的分析, 从而达到科学地做好安全管理, 确保大型散货船安全营运的目的。
2. 学位论文 陈国权. [散货船装载方案及过程优化设计](#) 2006
 对于绝大多数的散货运输船舶来说, 在散货货物船舶装卸的过程中, 装船方案编制者都需要兼顾船舶纵向受力和装船机沿岸来回移动等引起的安全和成本问题。目前还没有一种评判标准来评判各种装载方案的优劣。为了追求某一个目标或几个目标而忽略别的目标都可能影响船舶安全营运和营运成本的增加。因此本文结合散货船舶运输中的实际情况, 提出了通过优化装载方案来控制船舶装卸时船体受力的观点, 使船舶在整个装卸过程中受到的剪力、弯矩对船体强度的损害降到最小, 并在此基础上追求减少因为装卸货而造成的装船机沿岸来回移动引起的总累积移动距离的目标, 进而改善装载效率。
 本文首先利用小载荷调整对剪力和弯矩变化量的影响成线性关系的理论, 对给定初始状态的船舶纵向受力进行调整, 使得船舶所受的剪力和弯矩值能得到优化。在使用现有船舶装载(Mxmacs3-Seabulk)的基础上, 通过查看其剪力、弯矩曲线, 在明确待装散货总重量的基础上指导装船方案编制者确定货物装载的位置或者压载水排放的位置。在装货过程中装船方案编制者装货前分析强度分布曲线, 确定下一次货物装载的位置或者压载水舱排放的位置, 由于此法的不确定性, 导致方案的多样性。
 在散货装货过程中装船方案编制者普遍关心的两个问题为: 船舶强度和装船机沿岸移动总距离, 其中船舶强度包括剪力和弯矩两个方面。因此问题转化为如何使得船舶在装货过程中受到的剪力和弯矩的值最小和装船机来回移动的距离总和最小。本文采用多目标决策矩阵的理论, 根据个人的偏好分别给剪力、弯矩和装船机来回移动距离总和赋值, 根据方案的优劣顺序确定船舶装卸和压载水排注方案。本文在试验的过程中总是保证船舶的强度、最大吃水、最小吃水、吃水差、稳性等硬性条件符合规范或设备条件的要求, 保证了这些方案的可行性。这种综合考虑船舶装卸过程中船舶纵向受力和装船机来回移动总距离的研究使得评价散货船装卸过程是否优劣成为一种可能。
 在实际生产过程中, 装卸过程都缺少客观的方法来衡量装卸过程中方案的优劣性。本文正是以此为出发点提出了在改进最终装载方案的基础上对装卸过程进行综合评价选优。对某艘特定船舶来说, 装船方案编制者将船舶装卸过程中的强度和装船机来回移动距离实时备份, 并创建船舶装卸历史记录数据库, 利用本文提出的方法对各个吃水的装卸方案选优得到相应的最佳方案。这对船舶的使用寿命和码头的作业效率都具有很大的实际意义。
3. 期刊论文 林火平. [灵便型散货船装货计划](#) -[航海技术](#)2001, ""(1)
 此文阐述了制订灵便型散货船装货计划的必要性及制订装货计划时应遵循的基本原则。
4. 学位论文 尹茜. [船舶稳性控制系统](#) 2007

船舶在海上航行时, 由于受到海浪、海风及海流等海洋环境扰动的作用、油水系统的消耗以及大型物件的加卸载都会引起船舶的横向倾斜继而影响到船舶行驶的安全性, 不可避免地要产生各种摇荡。

船舶在随机海浪的扰动下发生摇荡运动, 进而不可避免地会造成船体的倾斜。首先本文根据统计叠加理论, 采用ITTC单参数标准海浪谱仿真模拟实际的长峰波随机海浪, 进而实时仿真长峰波随机海浪对船舶的随机扰动, 对船舶在波浪中的横摇和纵摇运动进行了时域仿真, 得到船舶摇荡运动的横摇角信号和纵摇角信号, 作为分析散货船装载稳性的依据。根据船舶波浪稳性的数学模型, 在波浪中的稳性变化进行了定量的计算和分析, 并进一步讨论了在波浪下的稳性高度的变化。

船舶配载系统也是船舶稳定性中的一个重要问题。货物运输中, 根据船舶舱容和货物性质、合理安排船上货物装载位置是一项细致复杂的组织工作。其目的在于充分利用船舶载重量和载货容积、保持船舶稳性和适航性以期获得最大的社会、经济效益。

散货船的运输在世界海运中占有十分重要的地位, 相应的散货船的安全习性应受到高度的重视。本文利用LoadRite 装载软件, 研究了货物载重量、积载因数等因素对船舶稳性的影响, 着重分析波浪对复原力臂曲线的影响。本文最后利用LoadRite 装载软件, 进一步讨论了船舶载重量、自由液面对船舶稳性的影响, 并分析了波浪对复原力臂曲线的影响。

5. 学位论文 王海鹰 压载水对固体散货船安全营运的影响 2008

在国际航运中, 散货船运输占货物运输的30%以上, 散货船已成为运输船舶的主力军。近十几年来, 散货船事故频频发生, 在影响散货船安全的诸多因素中, 船体强度处于主要地位。船舶装卸货和压载水更换操作是影响船体强度的重要因素。在装卸货和船舶压载航行的过程中, 压载水起到改善船舶纵倾、提高船舶稳性的作用, 更重要的是压载水的合理操作能够改善船体的纵向受力, 减轻船体结构疲劳。散货船在装卸货及压载水更换过程中的强度控制问题的核心, 就是要制定较优化的压载方案和压载水更换方案, 使整个过程中产生的剪力、弯矩对船体强度的影响最小, 以减小营运中存在的风险, 为散货船的安全营运服务。

本文结合笔者四年的航海实践, 对散货船舶的压载计划以及压载水更换计划进行了研究。重点研究散货船压载计划以及压载水更换计划中的强度控制问题, 并提出了制定压载计划和最优压载水更换计划的基本方法。

(1) 在压载计划的制定过程中, 首先要确定装卸货顺序、每一轮的装卸货量, 同时要了解装卸货的速度、压载泵的工作效率。然后确定压载计划, 本文在压载计划制定过程中利用少量载荷对船体强度的影响来确定压载量、压载位置、压载时机, 提出最小压载量的计算方法和压载量在全船纵向分布优化理论, 并且对船舶压载时的注意事项进行了详细的阐述。

(2) 在压载水更换计划制定的过程中, 利用加载临界点对压载舱位进行搭配, 从而控制弯矩变化。运用最优评价方法对所有的压载舱位搭配进行评定, 剪力变化最平稳、最均匀的为最优压载方案。对一些船舶的特殊压载舱不能利用排空法进行压载水更换时, 提出了利用溢流法更换。并且本文对备压计算的方法进行了论述, 并介绍溢流法更换压载水的注意事项。

6. 期刊论文 赵学岩, Zhao Xueyan 试论特殊装卸作业中散货船强度的控制 -天津航海2007, "" (2)

随着散货运输量的逐年增加, 船体的强度控制成为不容忽视的首要问题。结合实践经验, 针对散货船装卸过程中几种特殊情况, 分析了存在的船体强度问题, 提出了具体的解决措施, 以保证船体强度和航行任务的完成。

7. 学位论文 申友波 某油船改造为双舷侧散货船的直接设计研究 2009

船舶改造利用原有船舶, 根据市场需求和设计规范要求, 对船舶改装和改型, 其投资较低, 施工周期短, 效益明显。由于单壳油船海损事故的频繁发生, 国际海事组织制定了单壳油船淘汰计划, 将未到服务年限的单壳油船改造为散货船近年来十分常见。

有限元方法的基本思想是将结构离散化, 用有限个容易分析的单元来表示复杂的对象, 单元之间通过有限个节点相互连接, 然后根据变形协调条件综合求解。船体结构强度直接计算用有限元模型, 分别以杆、板、壳和梁等单元来模拟各构件的实际联系及受力状况。通过大型有限元软件分析求解, 可以求出各构件的变形与应力结果。这种方法是目前船体强度分析中较为准确、较完善的方法。

由于船体结构本身及其环境条件的复杂性, 船体结构强度直接计算方法分为两种, 舱段模型有限元分析方法和全船模型有限元分析方法。目前, 世界上各国船级社在船体结构强度直接计算中, 各自形成了独特的计算方法和强度标准, 并且在实际工程中得到广泛应用, 其适用性得到实际的检验。关于船体强度直接计算, 各船级社的具体规定存在着较大的差别, 但其主要内容和计算过程基本相同, 主要包括有限元模型的选取和建立、边界条件的施加、确定计算工况、载荷计算与施加、计算求解、结果分析。

本文利用大型有限元软件MSC. Patran、MSC. Nastran对80000DWT单舷侧油船改造为双舷侧散货船进行直接设计研究。根据实际船体结构设计图纸建立三维有限元计算模型, 对该船船体结构的屈服和屈曲强度进行了有限元直接计算分析, 为该船改造设计提供必要的依据。按照CCS《双舷侧散货船结构强度直接计算指南(2004)》的规定计算货物压力、舷外水压力、端面弯矩; 结构强度评估时, 许用应力按照CCS《双舷侧散货船结构强度直接计算指南(2004)》选取。利用CCS屈曲计算插件进行屈曲强度分析。

8. 期刊论文 沈恺, 秦圣平, Shen Kai, Qin Shengping 船体结构规范设计多媒体教学软件 -上海造船2002, "" (1)

船体结构规范设计多媒体教学软件是《船体强度与结构设计》课程的辅助教学软件。通过该软件, 学生们可以依照中国船级社《钢质海船入级与建造规范》的规定, 完成散货船横断面的设计和总强度的校核, 同时避免了繁琐的计算过程。该软件结合了多媒体技术, 有着良好的人机交互界面, 易学易用, 能显著提高教学效率和教学质量, 有着较好的推广价值。

9. 学位论文 唐惠宇 散货船装载过程优化的研究 2004

该文结合散货船运输中的实际情况, 提出了通过优化装载方案来控制船舶装货时强度变化的观点, 使整个装货过程中产生的剪力、弯矩对船体强度的影响尽量最小。初步建立了散货船装载优化模型, 并将遗传算法运用于该优化模型的求解。该文所开发的基于遗传算法的散货船装载过程优化软件, 可以作为装载仪中的一个子系统, 对各种装货过程进行优选, 最后得到一个近似最优的装货方案。经过优化的装货方案可以大大减小装货过程中船舶所受的剪力和弯矩最大值。该软件可以运用于实际生产, 通过控制船舶装货环节船体强度, 提高散货船的安全性, 延长船舶的使用寿命。

10. 学位论文 邱伟强 散货船船体强度计算工况研究 2000

该文的主要目的是运用动态载荷法, 完成对各载荷分量的合理组合, 通过对散货船船体应力的分析, 制定数种具有代表性的计算工况。该文所作工作可供中国船级社在修订规范作为参考, 并为制定规范中的强度标准提供前提条件。

引证文献(1条)

1. 李荣辉, 张军 散货船总纵强度校核的新要求[期刊论文]-航海技术 2009(3)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y855785.aspx

授权使用: 上海海事大学(wf1shyxy), 授权号: 8f5469a5-0b5a-41b1-a3d0-9e1e015792c9

下载时间: 2010年10月29日