



船舶

顺序法压载水 置换优化设计

OPTIMAL DESIGN
METHODOLOGIES
OF SHIPS' SEQUENTIAL
BALLAST WATER EXCHANGE

林焰 陈静 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

013932226

U661.2
02

船舶顺序法压载水置换优化设计

Optimal Design Methodologies of Ships'
Sequential Ballast Water Exchange

林焰 陈静 著



国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1639486

U 661.2
02

088580810

图书在版编目(CIP)数据

船舶顺序法压载水置换优化设计 / 林焰, 陈静著. —北京:
国防工业出版社, 2012. 12
ISBN 978 - 7 - 118 - 08462 - 7

I. ①船... II. ①林... ②陈... III. ①船舶压载 -
最优设计 IV. ①U661.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 026790 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京嘉恒彩色印刷责任有限公司
新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 11 3/4 字数 202 千字
2012 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777
发行传真: (010) 88540755

发行邮购: (010) 88540776
发行业务: (010) 88540717

前 言

船舶压载水管理是 IMO 公约强制性要求的,其方法的选择是船舶设计中的关键问题之一。相比溢流法和稀释法等压载水置换方法,顺序置换法以其耗时间短、效率高、费用低等特点成为设计人员的首选方法。顺序置换法简称“顺序法”,又称为“排空注入法”,是指先将压载舱内的水排出,再注入洁净的压载水的过程。若采用顺序法这种海上动态置换方法,置换方案的设计至关重要,它不仅直接决定置换时船舶的安全性,而且影响着船舶的建造和营运费用等诸多方面。本书着重阐述顺序法压载水置换设计问题及求解方法。

顺序法压载水置换设计需要满足很多安全技术要求,如完整稳性要求、结构强度要求和艏艉吃水要求等,因此置换方案的求解,属于带有多个非线性约束的多目标组合优化问题。当变量组合数目较多时,存在组合爆炸,计算具有复杂性。目前,置换方案的求解多采用人工经验法,不仅设计速度慢、周期长、反复修改的工作量大,而且不能保证求解出可行方案。对于变量组合数目多,其中存在的可行方案数目也很多的问题,不易求得其中的优秀解。落后的设计方法阻碍了顺序法这一快速、高效且经济性较好的置换方法的推广应用。针对这一问题,本书针对不同类型的现有船舶,阐述有针对性的新的置换策略和新的置换方案求解方法,可以实现最优置换方案的自动、快速和高效求解;对新设计的船舶,阐述提高置换时船舶的各项性能(包括浮态、总纵强度和驾驶室可视范围等指标,以下统一简称为“置换性能”)的新设计方法。

针对压载水舱数目多、每舱水量占总压载水量比例小的船型(如散货船等),存在变量组合数目太多,采用现有方法不易求得可行解和优秀解的难题,本书阐述了一种多舱同时对称置换策略与多目标优化算法相结合的求解方法。这种方法是在综合考虑压载水置换过程中的多种安全指标要求的基础上,建立可变舱数多舱同时对称置换问题的多目标数学优化模型,并引入基于 Pareto 解集的多目标遗传算法 NSGA - II 进行求解。书中详细描述了这一特殊求解算法。算法中采用了基于 Deb 非支配排序的多目标进化策略,可避免传统多目标罚函数法将多目标转化为单目标时权重值和归一化系数值难以设定的问题,并给出了一种非等位两点交叉算子来确保每个舱不会被重复置换。本书以一艘

176000DWT 双壳散货船的压载水置换问题为实例,进行了求解过程的描述,并分别对两对舱同时置换策略、三对舱同时置换策略、和四对舱同时置换策略进行了计算与比较。

针对压载水舱数目少、每舱水量占总压载水量比例大的船型(如油船等),存在采用传统的人工经验法难以求得可行解,采用多舱同时对称置换方法求解可行空间较小的难题,本书阐述了一种单舱对角线置换策略与多目标优化算法相结合的设计方法。此方法拓展了解的可行空间,可以求得采用对称置换优化设计方法求不到的可行解,并实现了优化的自动快速求解。书中给出了对角线置换的多目标数学优化模型和求解该模型的多目标遗传算法。算法中给出了一种新的左右分步非等位两点交叉算子,来确保左舷舱和右舷舱同时置换,并以一艘 50000DWT 双壳油船的置换设计为实例进行了求解过程的描述。

针对采用传统设计方法求不到可行置换方案,采用优化设计方法需要设计实现特殊的复杂优化算法,采用对角线置换还需要计算船体梁扭转强度,从而产生设计过程复杂、工作量大、耗时长等问题,本书给出了两种可以实现简易快速设计的启发式对称置换策略。这两种策略可以同时避免特殊优化算法的设计与实现及船体梁扭转强度的计算校核工作,只需用简易算法就可以求得工程满意方案,使设计过程简易快速,设计出的方案安全可靠、操作灵便性好。本书还详细描述了两种启发式对称置换策略的适用范围和简易算法,并分别通过设计实例介绍了求解过程。

针对船舶压载水置换方案设计时,可能漏掉置换过程中最危险时刻的计算校核这一问题,本书在详细描述置换过程数值仿真计算流程的基础上,利用两种不同类型船舶的置换方案数值仿真计算实例,探讨了采用不同步长对选定方案进行压载水置换过程仿真计算可能产生的误差大小、最危险时刻差异及可能给船舶安全性带来的影响。

好的主船体分舱布置不仅可以提高船舶的置换性能,还可以使压载水置换对结构强度的要求最小,从而有可能减小结构尺寸、降低结构质量。针对很多现有船舶不存在顺序法置换可行方案的问题,本书阐述了一种基于最佳船舶压载水置换性能的主船体水密分隔布置方法。采用该方法,可以在分舱布置阶段就解决置换方案求解难的问题,这样不仅可避免设计反复、减少设计人员的工作量,还可以使设计出的船舶避免使用溢流法和稀释法,从而可提高置换速度、降低建造和营运成本。主船体内部的水密分割布置设计也属于带有多种非线性约束的多目标组合优化问题,该方法以压载水纵向舱长为设计变量,以置换时多个船体性能最佳为目标,以置换满足安全要求为约束,建立数学优化模型,引入多目标遗传算法进行求解。书中详细描述了其数学模型与求解算法,并给出了计

算实例。

最后,本书给出了有关压载水置换优化设计系统的基本设计思想、实现方法、关键技术等内容。在充分了解压载水置换优化设计系统功能需求的基础上,分析了系统总体处理流程,描述了系统总体和内部结构框架及数据流传输等问题。

本书的内容以作者及所在教研室的教师近四年的研究成果为主体,参考了国内外有价值的相关研究成果,希望本书能对读者理解及解决压载水置换设计问题有所帮助,同时对顺序法压载水置换方法实际应用的推广有所帮助。

全书共分为8章:第1章为绪论,第2章概述了遗传算法的原理与常用算子以及多目标优化问题的常用求解方法,第3章阐述了多舱同时对称置换组合优化设计方法,第4章阐述了对角线置换组合优化设计方法,第5章介绍了两种可以实现简易快速设计的启发式置换策略,第6章介绍了置换过程仿真计算的相关问题,第7章阐述了基于最优置换性能的分舱优化设计方法,第8章概述了置换优化设计系统的实现方法。

本书可作为船舶与海洋工程学科的研究人员、技术人员和教师以及相关专业研究生的科研参考资料,也可以作为本科生的教材或教学参考书。

顺序法压载水置换问题属于复杂工程设计问题,要求达到工程实用化。由于时间有限,书中的研究内容只是一些粗浅的尝试,还有很多问题有待深入研究。希望本书能起到抛砖引玉的作用,引起更多的研究和讨论,对从事船舶设计工作的读者有所帮助。由于编者水平有限,书中错误之处在所难免,望读者批评指正。

编者

2011年7月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 船舶压载水管理技术及研究意义	1
1.1.1 为什么需要对船舶压载水进行管理	1
1.1.2 船舶压载水管理目前存在哪些方法	5
1.1.3 各种船舶压载水管理方法的特点及技术进展	6
1.2 顺序法船舶压载水置换技术及其研究进展	11
1.2.1 顺序法的研究进展及其存在的问题	11
1.2.2 顺序法置换方案求解策略	14
1.3 船体性能计算方法及其研究进展	16
1.3.1 船体外壳的曲线曲面表达	17
1.3.2 主船体分舱优化与舱容积算	17
1.3.3 船舶自由浮态计算	19
1.3.4 船舶完整稳性计算	19
1.3.5 船体梁总纵弯曲强度计算	20
1.3.6 船体梁纵向扭转强度计算	22
1.3.7 船舶驾驶室视野盲区范围计算	24
第 2 章 多目标优化问题求解算法概述	25
2.1 遗传算法概述	25
2.1.1 遗传算法的起源与进展	25
2.1.2 遗传算法中的常用概念	25
2.1.3 遗传算法常用操作算子	26
2.1.4 遗传算法步骤及特点	27
2.2 多目标优化问题求解方法概述	28
2.2.1 多目标优化问题的基本概念	28
2.2.2 多目标进化算法研究现状及进展	29
2.2.3 多目标优化问题的约束处理方法	33
第 3 章 顺序法多舱同时对称置换组合优化设计	35

3.1	问题的特点与规模	35
3.2	问题的求解假设与安全衡准	35
3.3	问题的数学优化模型	36
3.4	问题的多目标遗传算法	38
3.4.1	染色体编码机制	38
3.4.2	个体间的约束支配准则	38
3.4.3	个体间的非支配排序	38
3.4.4	个体适应度赋值算子	39
3.4.5	非等位两点交叉算子	40
3.4.6	算法中的其他算子	41
3.4.7	算法流程	41
3.5	设计实例一与结果分析	44
3.5.1	设计实例	44
3.5.2	方案与讨论	45
3.6	设计实例二与结果分析	52
3.6.1	设计实例	52
3.6.2	方案与讨论	53
第4章	顺序法对角线置换组合优化设计	61
4.1	问题的特点与规模	61
4.2	问题的安全衡准要求	62
4.3	问题的数学优化模型	63
4.4	问题的多目标遗传算法	64
4.4.1	染色体编码机制	64
4.4.2	个体间支配关系与群体排序规则	65
4.4.3	一种特殊的“左右分步非等位两点交叉算子”	65
4.4.4	其他操作算子	66
4.4.5	算法流程	66
4.5	设计实例与结果分析	67
4.5.1	设计实例	67
4.5.2	方案与讨论	71
第5章	顺序法单舱辅助启发式对称策略	77
5.1	先排一舱对称置换策略	77
5.1.1	适用范围及简易算法	79
5.1.2	设计实例一及结果讨论	79

5.1.3	设计实例二及结果讨论	84
5.1.4	设计实例三及结果讨论	87
5.2	先注一舱对称置换策略	90
5.2.1	适用范围及简易算法	90
5.2.2	设计实例及结果讨论	92
第6章	顺序法置换过程仿真计算	97
6.1	算法流程	97
6.2	数值仿真计算实例	99
6.2.1	实例一及结果讨论	99
6.2.2	实例二及结果讨论	106
第7章	基于置换性能的船体分舱优化设计	125
7.1	问题的特点与规模	125
7.2	问题的数学优化模型	126
7.3	问题的多目标遗传算法	128
7.3.1	染色体编码机制	128
7.3.2	个体间的排序机制与个体适应度赋值	128
7.3.3	差量分摊等位交叉算子	128
7.3.4	变异算子	130
7.3.5	其他算子	130
7.3.6	算法流程	130
7.4	计算实例与结果分析	132
7.4.1	计算实例	132
7.4.4	计算结果与讨论	137
第8章	压载水顺序置换优化设计决策系统关键技术	141
8.1	置换优化设计决策系统框架结构	141
8.1.1	技术与功能定位	141
8.1.2	系统基本功能模块	142
8.2	置换优化设计系统功能实现	143
8.2.1	置换优化模型及求解	143
8.2.2	置换优化系统的数据流传输	144
附录A	英文缩略语表	146
附录B	船舶压载水管理计划编制指南 ^[19]	148
B.1	目的与常用定义	148
B.2	船舶压载水管理计划的制订	148

B.2.1	目的和一般要求	148
B.2.2	计划编制过程	149
B.2.3	计划内容要求	149
B.2.4	压载水管理计划的评估和修改	157
B.2.5	审批压载水管理计划所需的图纸资料	157
B.3	安全评估	158
B.3.1	一般要求	158
B.3.2	压载水置换方法	159
B.3.3	安全因素	159
B.3.4	安全评估	160
B.3.5	顺序法	161
B.3.6	溢流法	161
B.3.7	稀释法	163
附录 C	计算机软件著作权登记证书	165
C.1	基于单舱对角线置换策略多目标遗传算法的船舶顺序法 压载水置换管理软件	165
C.2	基于多舱对称置换策略多目标遗传算法的船舶顺序法 压载水置换管理软件	166
C.3	基于多目标遗传和顺序法压载水置换性能为船舶分舱 优化设计软件	167
参考文献		168

第1章 绪 论

1.1 船舶压载水管理技术及研究意义

1.1.1 为什么需要对船舶压载水进行管理

由于稳性和安全的原因,远洋航船需要携带大量的压载水(图 1.1)。而船舶将大量压载水从一个海域携带到另一个海域进行排放,造成了有害物种和病原体的传播。当有害物种或病原体侵入一个新的海域后,可能会造成诸如以下的严重后果。

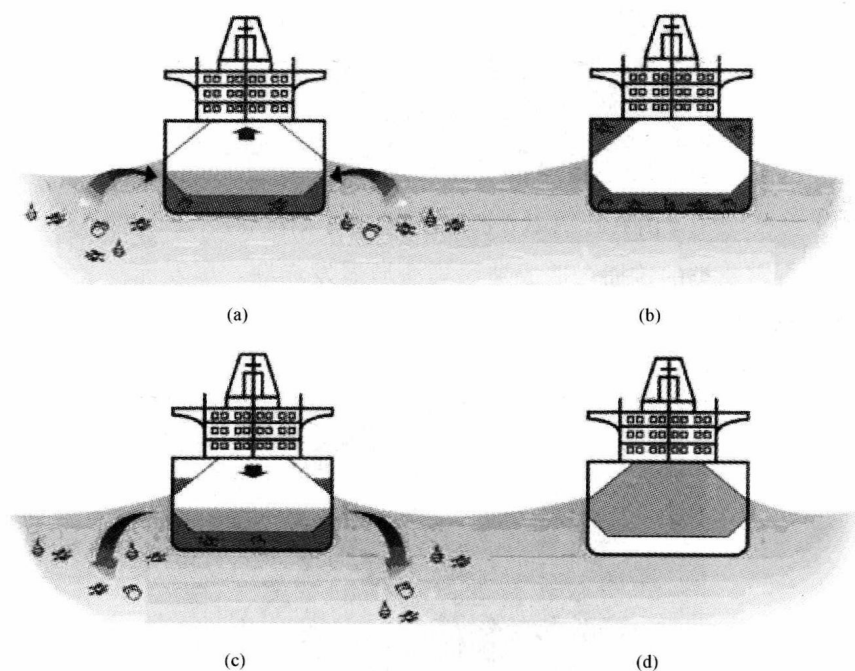


图 1.1 压载水注入与排放循环过程^[1]

- (a) 港口卸货,装压载水;(b) 运输途中,压载水舱满,货舱空;
(c) 目的港装货,排压载水;(d) 运输途中,货舱满,压载水舱空。

(1) 当有害物种的繁殖和生存能力超过当地物种,有害物种会迅速占领当地海域,使当地海域的一些原物种大量死亡甚至绝种^[2]。图 1.2 是一种源于亚洲的金色贻贝,它吸附在货船的压载水舱中,在远洋航行的过程中迅速地繁殖。在巴西港口被排放出来后,它黏附在各种内陆河船舶的管道上,从巴西传播到阿根廷、巴拉圭和乌拉圭。这种生物蔓延迅速,可快速扼杀湖泊、河流中的生物链,摧毁养鱼业,堵塞水道和污水处理厂管道,破坏力极强^[3]。

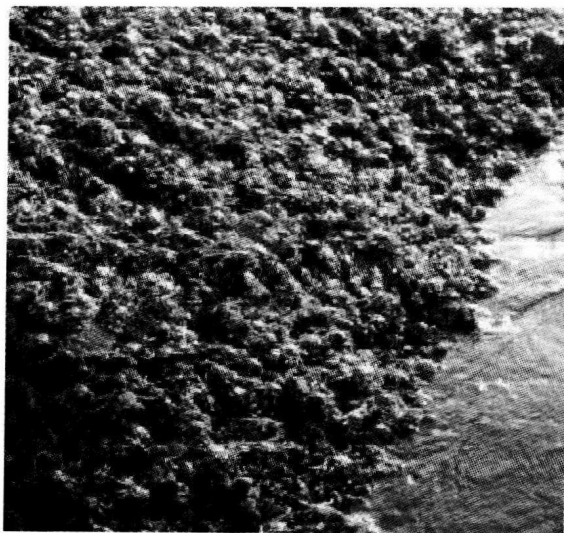


图 1.2 压载水携带的金色贻贝入侵巴西^[4]

(2) 有害藻类的传播会造成被污染海域爆发赤潮。爆发赤潮之后,可使其覆盖下海域中的海洋生物因缺氧或者受赤潮分泌毒素影响而大量死亡。这对海洋环境、海洋生物。



图 1.3 2007 年 12 月 13 日美国佛罗里达州赤潮中死亡的海豚^[5]

水产养殖与捕捞都造成很危害,甚至会通过食物链对食用了毒素的人类造成危害。1996年,美国南部海域爆发赤潮,使美国佛罗里达州10%的海牛死亡,并使墨西哥162只海豚死亡。图1.3为2007年12月13日发生的美国佛罗里达州的赤潮,此次赤潮造成6只海豚死亡^[5]。图1.4为2004年6月18日中国大亚湾口爆发的赤潮^[6]。图1.5为2008年6月中国青岛爆发的赤潮^[7],此次赤潮发生在中国2008年奥运会前期,为了不使原定在该海域的帆船比赛受到影响,海藻清理工作耗费了大量的人力、物力,造成了巨大的经济损失。赤潮已被称为“海洋癌症”^[8]。



图1.4 2004年6月18日大亚湾口赤潮^[6]



图1.5 2008年6月中国青岛爆发的赤潮^[7]

(3) 病原体的传播对人类造成危害。19 世纪 70 年代早期,由压载水携带的病菌排在秘鲁周边海域,污染了其海域内的海洋生物。当地群众食用了这些海产品后,引起了霍乱,造成多人死亡^[9]。

(4) 强繁殖能力的有害生物可能给工业生产和人民生活带来危害,并可能造成巨大的经济损失。例如,著名的斑马贻贝是一种非常有害的生物。它体积很小,最长的也不超过 4cm(图 1.6)。自 1988 年由压载水排放入美国五大湖区后,其繁殖能力惊人,迅速占领了其排放地海域,并向周边海域扩散。它的破坏力十分惊人,常常造成工厂和生活等排水管道堵塞,给生产和生活造成了巨大困难。美国每年都花费巨额资金用于斑马贻贝的清理工作,这每年都给该地区造成数百万美元的经济损失。时至今日,此问题还未能彻底解决^[12]。图 1.7 为美国米尼苏达州一艘驳船外壳上吸附的斑马贻贝^[11]。

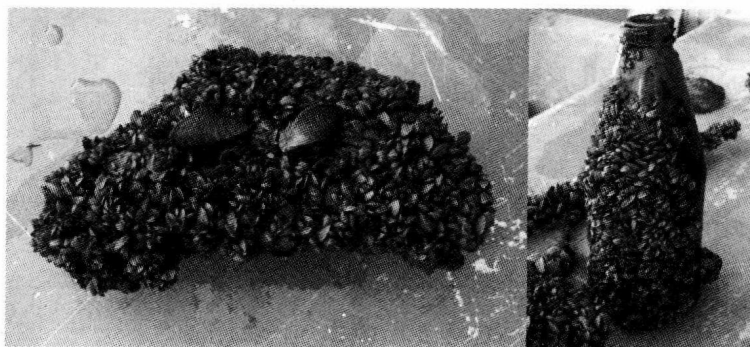


图 1.6 斑马贻贝外形图^[10]



图 1.7 美国米尼苏达州一艘驳船外壳上吸附的斑马贻贝^[11]

随着人们对压载水随意排放带来危害的深入认识,越来越多的国家开始关注这一问题。1997年,IMO开始致力于制订规范来控制和管理船舶压载水和沉积物的随意排放问题^[13-17],并宣布将压载水入侵生物传播与陆上排放、对海洋生物资源的掠夺性开发利用、海洋栖息环境的改变并列为海洋面临的四大危害。2004年2月13日,IMO通过了《国际船舶压载水和沉积物管理与控制公约》(the International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments)^[15]。该公约需要代表全世界商船总吨位35%的至少30个国家批准一年后才能正式开始执行。但是由于技术和经济等各方面原因,直至2010年4月12日,仅有22个国家加入该公约,占世界商船总吨位的22.65%。这仅满足公约生效的条件过半。在公约未生效的情况下,为了防止船舶压载水带来的危害,一些国家和地区,如加拿大、智利、阿根廷、巴西、新西兰、以色列、澳大利亚、日本、美国及美国国内的一些独立的州和港口就压载水更换区域相继进行了单边立法。

我国作为航运大国和IMO的A类理事国,目前远洋船舶总吨位占世界总吨位的3.4%,是世界第二大海洋运输国。随着我国加入世贸组织,对外贸易的不断发展,近年来,停靠我国港口的外籍船舶也在不断增多。我国对压载水外来物种入侵的研究起步较晚,相关法律法规相对缺乏,尚不能满足目前我国防治压载水污染管理的需要。船舶压载水对我国近海域环境和经济发展带来的巨大威胁和危害也日益凸显出来。据调查,我国海洋入侵物种已达141种,其中赤潮藻类物种占11%^[18]。这些外来赤潮生物对环境适应能力强、分布广,只要环境适宜,就会爆发大规模赤潮,导致海洋生态系统的结构和功能崩溃,给捕捞业、养殖业造成巨大损失。国家环保总局的调查数据显示,我国外来入侵物种每年所造成的经济损失高达574亿元,其中海洋入侵生物是主要成因之一^[3]。我国对船舶携带压载水的排放进行管理,刻不容缓。

1.1.2 船舶压载水管理目前存在哪些方法

压载水管理主要是指采用单独或合并的机械、物理、化学和生物处理方法,清除、无害处置、避免摄入或排放压载水和沉积物中的有害水生物和病原体^[19],达到避免污染的目的。压载水管理(Ballast Water Management, BWM)方法主要分三类:置换法(Exchange)、处理法(Treatment)和隔离法(Isolation),如图1.8所示。其中IMO认可的海上置换方法有顺序法、溢流法和稀释法;处理法主要有机械法、物理法、化学法和混合法等;隔离法主要有原形处理、排入接受设施和带回原加装池等方法^[13, 20, 21]。根据IMO规范规定,需要实施压载水管理的船舶,必须要预先编制压载水管理计划,以指导船上人员安全、合理地进行压载水管理和操作,确保船舶的压载水管理符合公约规定的管理标准^[19]。制订计划

时,应对船舶选定的压载水置换方法,按照规范^[19]进行安全评估,确保对特定的压载舱所选择的置换方法安全可行。如果评估结果表明船舶的某舱不适合采用该方法,则应另行考虑其他置换方法。然而,很多研究结果表明,无论是对现有船舶还是新设计船,无论采用置换法还是处理法,对压载水实施管理都存在一系列的技术及经济问题,实施压载水管理并非易事^[20, 22, 23]。

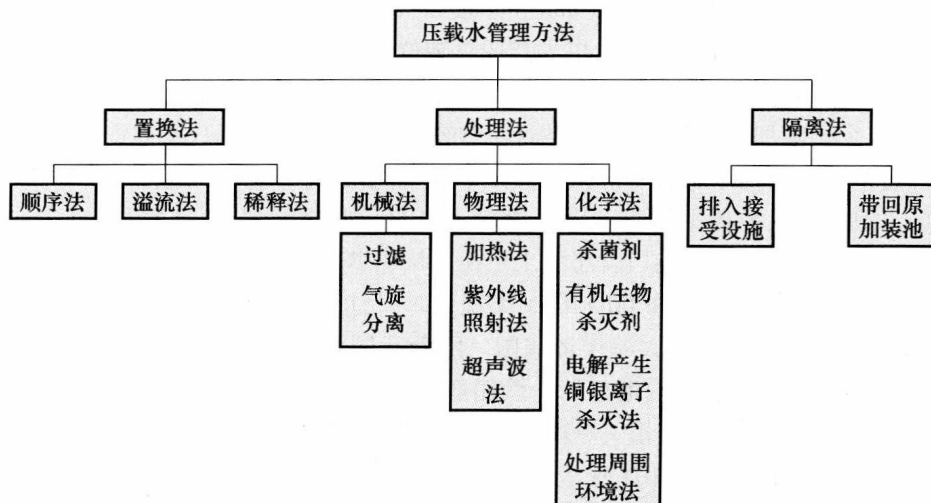


图 1.8 目前存在的压载水管理方法^[20]

1.1.3 各种船舶压载水管理方法的特点及技术进展

顺序法(Sequential Method)也称为排空注入法^[19],是指先将装有压载水的压载舱排空,再注入洁净压载水的过程,以达到置换率至少为压载水体积的95%。顺序法有以下优点:

(1) 置换率高。在三种置换方法中,顺序法是公认的最有效、最彻底的置换方法。因为用顺序法可以完全排空既有的压载水和沉积物,而注入全新的压载水。置换率可达到95%~99%。

(2) 耗时少。顺序法是三种置换法中置换速度最快的。

(3) 船舶需在海上停留的时间短。置换耗时少,意味着船舶在海上停留的时间就短。这样一方面减少了由于天气或海况原因使船舶发生危险的概率,另一方面节省了营运成本。

(4) 船员安全性高。不需要船员到甲板上作业,尤其是在夜间和甲板结冰的情况下,大大减少了船员发生危险的概率。

(5) 建造成本低。采用顺序法,相对于溢流法或稀释法,不需要布置多余的

泵系和管系,造价较低。

(6) 节能减排性好。顺序法消耗的发电机电力大约是溢流法和稀释法的 $1/4 \sim 1/3$ ^[24],排放的有害气体量也仅为溢流法和稀释法的 $1/4 \sim 1/3$ 。

顺序法的置换过程是,在船舶航运状况下排出并注入大量的压载水,需要综合考虑气候、海况、海上附加载荷、船舶的完整稳性、结构强度、浮态、螺旋桨浸没、驾驶室可视范围、置换时间及置换完成的概率等复杂安全因素。若置换方案设计不当或置换操作有误,容易使船舶的稳性、总纵强度、艏艉吃水等指标发生较大变化而超出安全许可范围。此外,顺序法对天气的要求也很高,在相对恶劣的天气情况下,不可以实施顺序法置换。

溢流法(Flow - Through Method)^[19]是将替换的压载水用泵打入压载水舱,使舱内多余的压载水从溢流口或其他装置流出的过程。采用该方法时,在深海由泵向已注满的压载水舱注水,让水溢流,至少应以三倍该舱容积的水量流经该舱(图 1.9 所示)。Reid D. F., Verosto S. 和 Chang P. 等人^[25]采用实船实验和 CFD(Computational FluidDynamics)模型相结合的方法,验证了使三倍该舱容的水量流经压载水舱,可使置换率达到 95%^[25-28]。图 1.10 为该试验中的实船溢流法置换现场。



图 1.9 一艘正在采用溢流法进行压载水置换的船舶^[29]

稀释法(Dilution Method)^[19]是将替换的压载水从压载水舱顶部注入,同时以相同的流速从底部排出的过程,舱内水位在压载水更换作业的全过程中保持不变。采用稀释法需要两套泵系,一套从舱顶注入新的压载水,另一套将舱内压载水从舱底泵出。这两套泵系可以同样的流速工作,因此,在置换过程中,可保持舱内液面高度、舱内压力不变。

溢流法和稀释法的优点是在执行过程中不会改变船舶的稳性、强度、浮态、