

海洋拖曳系统动力学与设计

Haiyang Tuoye Xitong Donglixue yu Sheji

王志博 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

海洋拖曳系统动力学与设计

王志博 著

国防工业出版社

·北京·

内容简介

与遵循设计规范的结构工程设计不同,拖曳系统的设计较大程度的依赖动力学模拟计算,在确定了设计思路和设计参数后,再行设计拖曳系统。本书基于各类军用拖曳装备的研制,包括深海拖曳探测系统、高速浅海拖曳声呐、多用途拖曳线列阵、潜艇用拖曳信标等各类拖曳系统研制经验的总结。基于对拖曳系统动力学建模理论的系统总结归纳,形成完备的拖曳系统动力学理论体系,是国内首本关于拖曳系统的理论专著,反映出近四十年来拖曳系统动力学的发展概貌与研究方向。

本书总结了拖曳系统的设计方法和研究现状,第一章介绍了水下拖曳系统的组成;第二章首先介绍了拖曳系统的三类动力学建模方法,而后扩展到考虑弯曲的低张力缆的动力学模型,进而介绍了耦合计算流体力学的计算建模方法,最后介绍了水面端和水下端的运动建模;第三章介绍了拖曳系统直航和水面船操纵运动的响应规律;第四章介绍了拖曳系统的振动传递和隔振设计方法。最后介绍了拖曳系统的设计与分析方法。

本书可用作从事拖曳系统设计制造和使用的专业技术人员的技术指导参考书,也可作为高等院校船舶与海洋工程、海洋资源开发技术、海洋渔业科学与技术等相关专业本科生、研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

海洋拖曳系统动力学与设计/王志博著. —北京:

国防工业出版社,2019.5

ISBN 978-7-118-11822-3

I. ①海… II. ①王… III. ①海船—甲板机械—系统
动态学②海船—甲板机械—系统设计 IV. ①U674
②U664.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第089114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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 13½ 字数 242千字

2019年5月第1版第1次印刷 印数 1—1500册 定价 68.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

序 言

海洋是生命的摇篮也是无尽的宝藏,认识海洋世界、深耕蓝色国土是我国迈向海洋强国的必由之路,海洋开发探测先行。水下拖曳系统是一类典型的水下探测装备,具有调查效率高、适应性好、抗干扰能力强等突出特点,在河流、海洋地质和水文资源调查等方面有广泛的应用。然而拖曳系统面临搭载多样化的探测系统、完成多样化的探测任务的问题,为了适应低速拖曳和高速拖曳、浅水拖曳和深海拖曳,需要采用不同的拖曳系统设计方法,在海洋复杂的水面和水下环境中,拖曳系统的主动控制和抗干扰设计则需要更多重视。

本书全面介绍了拖曳系统的组成,系统阐述了拖曳系统结构动力学的基础理论和求解方法。在给出拖曳系统直航拖曳运动响应的基础上,完整描述了拖曳系统受水面扰动的动力学行为,详细分析了拖曳系统操纵性特征,建立了拖曳系统的操纵运动响应、振动传递和隔振设计概念、拖曳体设计方法和主被动控制方法。

本书着重阐述拖曳系统操纵学和多段式拖曳系统、多分枝拖曳系统隔振设计,是近年来对拖曳系统动力学建模和设计方法的很好总结。本书将为面向海洋工程研究和设计的科技工作者开展拖曳缆系统的相关设计制造工作提供有力的参考。

中国工程院院士

徐芑内

前 言

拖曳系统是用于水下探测和开发的重要装备。拖曳系统的基本组成包括绞车、拖曳缆、拖曳体(线列阵)。由于拖曳系统需要承担的任务多样化,在结构动力学响应分析中,需要更为灵活地运用建模方法模拟拖曳系统的动力学响应。

本书对拖曳系统动力学进行了系统的介绍,着重阐述了拖曳系统动力学建模方法,介绍了拖曳系统的操纵运动响应行为,归纳了操纵运动中的线性响应和非线性响应现象,对水面直航、转向和回转运动进行了对比,引入了回转操纵参数和结构参数的响应关系。针对多段式设计和多分枝设计的操纵运动响应,模拟得到了操纵间歇响应放大行为和周期性振动效应转换等现象。针对多段式的拖曳系统,建立多段式动力学模型,利用拖曳系统的隔振设计实现高阻尼效应,消减了拖曳系统受迫振动的传递,改变了扰动传递频率和振幅。

本书对缆的选型和性能设计,各类拖曳体的设计方法进行了系统的介绍,在对拖曳体进行结构分类的基础上,介绍了拖曳体总体布置、水动力设计方法,以及设计方法适用的范围。拖曳系统集成机械、控制系统、探测与信号采集系统,是典型的集成系统。由于没有可遵循的设计准则和规范,需要力学、机械、电路、控制等专业密切协作,才能实现拖曳系统的各项性能指标。

本书部分研究成果由国家自然科学基金(项目号:51709133)支持,由于著者能力和认识水平所限,错误和不当之处在所难免,恳请读者批评指正,提出宝贵意见。对本书有任何问题可联系 wwzb3@163.com,期待与您的交流。

作者
王志博

目 录

第一章 水下拖曳系统的组成	1
1.1 水下拖曳系统的组成	1
1.2 拖曳系统的分类	2
1.3 绞车的结构	5
1.4 拖曳缆与导流装置	6
1.5 导流缆的设计	16
1.6 拖曳体的类型	18
第二章 拖曳系统的动力学模型	22
2.1 拖曳系统的受力分析	22
2.2 有限差分法模型的建立与求解	23
2.3 考虑缆索弯曲刚度的动力学计算模型	27
2.4 有限元模型建立与求解	31
2.5 凝集参数法模型与求解	39
2.6 拖曳缆系统定常缆形的模型	43
2.7 耦合计算流体力学方法的拖曳系统动力学方法	46
2.8 拖曳体的动力学建模	48
2.9 拖曳体的水动力性能设计与运动稳定性	54
2.10 拖曳系统受到拖曳母船的摇荡运动影响建模	56
第三章 拖曳系统的直航拖曳与操纵运动	58
3.1 拖曳系统的直航拖曳运动响应	58
3.2 双船宽面拖曳	64
3.3 拖曳系统的回转操纵运动	70
3.4 二段式拖曳系统的回转运动	87
3.5 多分枝缆的回转运动	114
第四章 拖曳系统的振动传递与隔振方法	135
4.1 定速直航状态下的输入型强迫振动的传递规律	135
4.2 拖曳系统变速运动的典型现象	145

4.3	加速运动与拖曳系统的结构参数振动频率响应规律	153
4.4	操纵运动中振动的传递规律	160
4.5	多段式拖曳系统的强迫振动的传递	168
4.6	拖曳系统隔振设计方法	172
第五章	拖曳系统的设计方法	183
5.1	拖曳系统总体设计	183
5.2	拖曳体总布置设计与系统总成	186
附录	200
参考文献	204

第一章 水下拖曳系统的组成

拖曳系统是水下能源开发资源探测的重要工具。作为一种典型的被动系统,拖曳系统常常搭载电磁、光学、声学、化学测量等传感器,潜入水下的近海底水域,探测海底地质和水环境采样、开发各类油气资源。早在第一次世界大战期间,美国海军物理学家 Harvey Hayes 发明的被称为“电鳗”的拖曳声呐阵列,被公认为第一个拖曳声呐阵列,它采用了两条电缆,每个电缆上安装了十几个水听器,专用于探测水下潜艇的活动。

由于拖曳系统工作在复杂恶劣的海洋环境下,拖曳系统受到各种扰动作用,对拖曳体搭载的探测装备产生不利影响,这对当代拖曳系统抵抗扰动的设计方法提出了更高的要求。

1.1 水下拖曳系统的组成

拖曳系统的基本构成包括母船、绞车系统、甲板吊放系统、拖曳缆、拖曳体,为便于布放,拖曳系统常布置在母船的尾部甲板上,大型深水拖曳系统还需要借助门吊作为布放回收机构和拖曳缆绳支撑点,图 1-1 显示了单体重力式拖曳系统和多段式拖曳系统的基本组成部分。

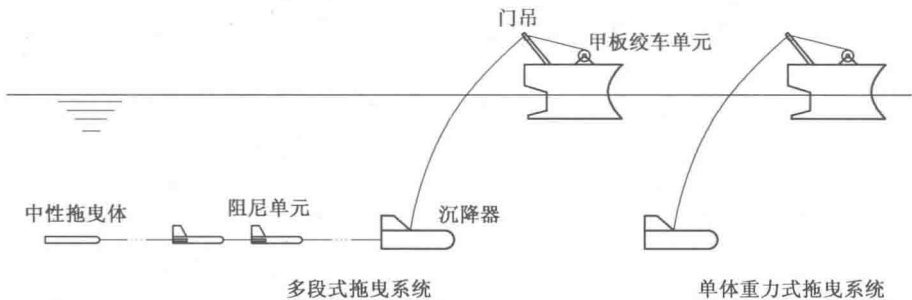


图 1-1 单体重力式拖曳系统和多段式拖曳系统的组成

单体重力式拖曳系统是指拖曳缆的水下端连接的拖曳体的重力远大于浮力,在设计拖速下实现拖曳系统下潜到指定的水深。这类拖曳系统组成简单、布放回

收便捷,但是该类拖曳系统存在难以克服的隔振缺陷,拖曳体难以抵抗因水面母船的摇荡传递而来的扰动,即使采用主动控制措施,也难以实现良好的控制效果。

多段式拖曳系统是在设计拖曳速度下依靠沉降器的重力实现拖曳系统下潜到指定的水深,而后连接若干个起到隔离由水面传递而来的振动的隔振单元,这些隔振单元常设计成为重力和浮力接近的中性浮体,利用中性浮体产生的水动力阻尼效应消减传递而来的扰动,最后在尾端连接水中近乎中性的搭载探测系统的拖曳体。

多分枝拖曳系统的设计中依据设计航速范围,依靠沉降器实现各中性分枝下潜到指定潜深,每个分枝连接了隔振单元和拖曳体。

拖曳线列阵是拖曳缆连接隔振单元后再连接水下线列阵,线列阵是利用一段近似水下中性的零浮力缆连接沿缆布置的传感器构成,该段零浮力缆上等间距地安装有各类传感器,以水听器为主。常利用浮力材料包覆沿缆分布的水听器周围,使线列阵部分近似水中零浮力。

本书以图 1-1 和图 1-2 显示的带有隔振设计的拖曳系统的结构形式为主要研究对象,探讨拖曳系统的操纵运动响应和振动传递特性。单体重力式、多段式和多分枝三种拖曳系统结构是拖曳系统的典型结构,对其操纵性能和运动与振动传递规律的计算分析总结的规律具有普遍意义和一般性,运动响应规律可外推到新型拖曳系统的设计中。

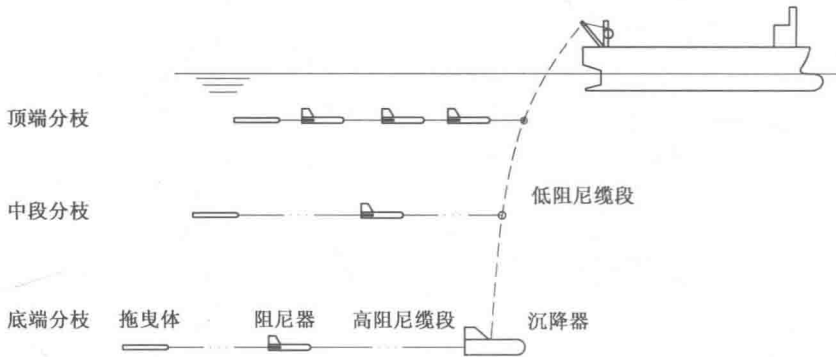


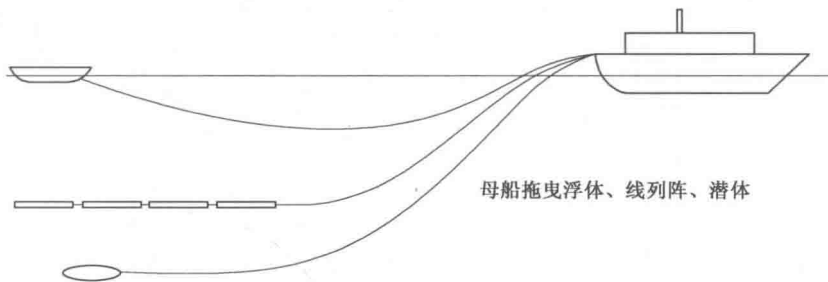
图 1-2 多分枝拖曳系统

1.2 拖曳系统的分类

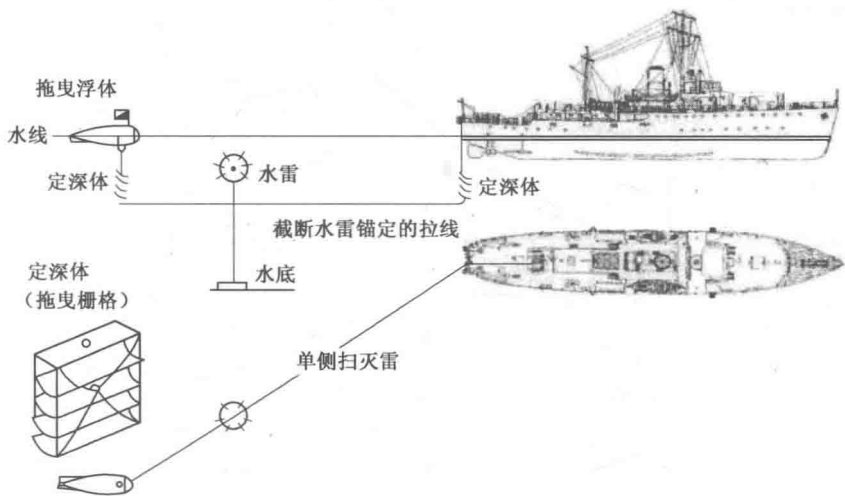
按照拖曳系统潜水深度将其分为简便型浅水拖曳系统、大型深水拖曳系统;按照拖曳速度可分为低速拖曳系统和高速拖曳系统;按照拖曳类型分为拖

曳线列阵和拖曳体系统;按照悬挂拖曳体个数分为单缆拖曳、多段式拖曳;按照拖曳点个数分为单点拖曳、双点拖曳、多点拖曳;按照拖曳缆是单枝还是多枝拖曳称为单缆拖曳系统和多分枝缆拖曳系统;按照连接重力式拖曳体个数分为单体拖曳系统和多段式拖曳系统;按照拖船配合关系分为单船拖曳和双船拖曳,以及水下潜艇拖曳;按照拖曳体是否漂浮在水面分为浮筏拖曳和潜体拖曳。

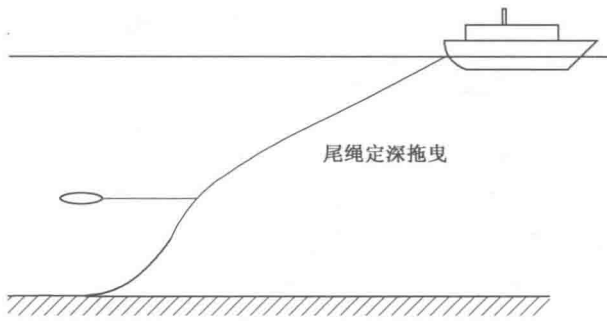
漂浮在水面的浮筏除了受到重力浮力和水流阻力外,还受到波浪作用力和风阻力。在建立水面浮体的动力学模型时,受到的波浪力可利用莫里森公式进行估算,上述典型的拖曳系统结构如图 1-3 所示。



(a) 水面母船可回收拖曳系统



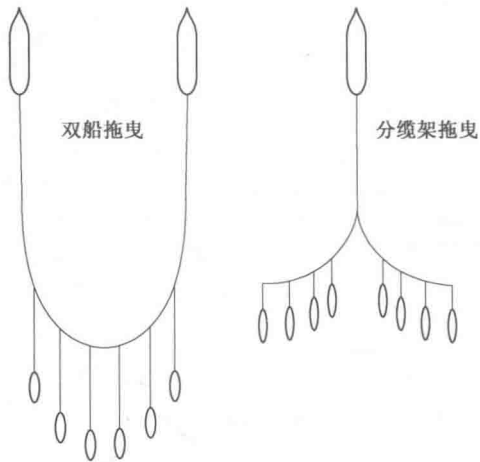
(b) 灭雷拖曳系统



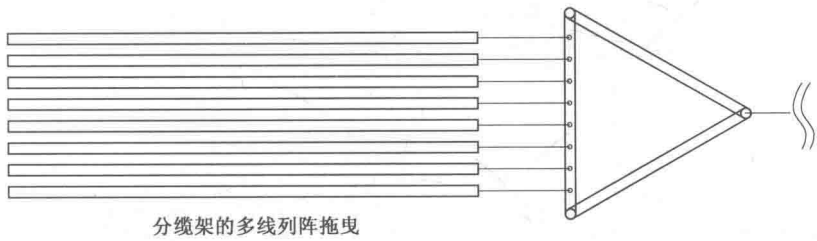
(c) 定深拖曳系统



(d) 潜艇水面释放拖曳系统



(e) 双船拖曳与多分枝拖曳



分缆架的多线列阵拖曳

(f) 分缆架拖曳

图 1-3 常见的各类拖曳系统的结构和种类

1.3 绞车的结构

绞车是由连接甲板的固定支架、卷筒、收放缆机构等组成,如图 1-4、图 1-5 所示。绞车装有自动排缆机构可将缆规则地回卷到卷筒上。利用自动排缆机构可避免出现对缆绳的挤压、扭绞和过度张拉,合理地利用卷筒容积。根据绞车容量可将绞车分为轻便型绞车和大容量绞车。由于绞车起到承受牵缆力的作用,不论是轻便型绞车还是大容量绞车都需要设计与甲板连接的固定结构,轻便型绞车可利用缆绳与锚缆桩固定、大容量绞车则需要设置特定的固定结构。

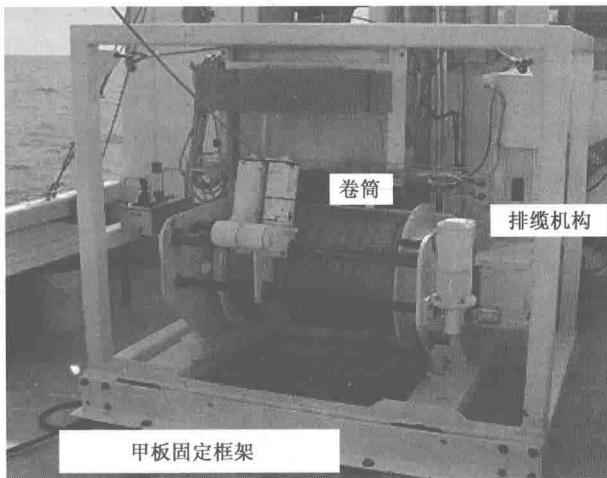


图 1-4 轻便型绞车的主要结构

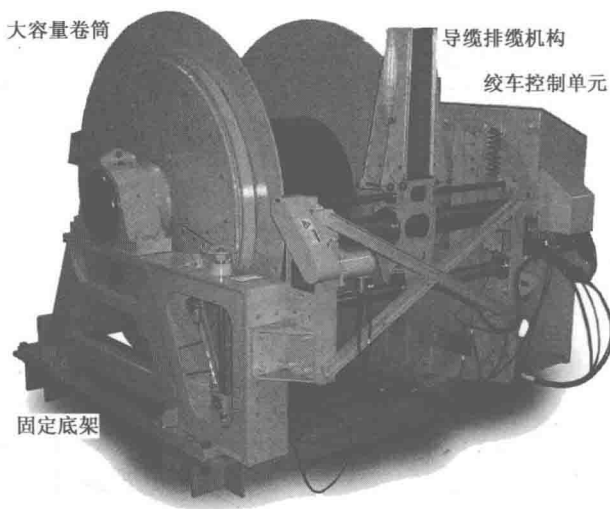


图 1-5 大容量绞车的主要结构

1.4 拖曳缆与导流装置

拖曳缆是拖曳系统的关键组成部件。拖曳缆起到了电力输送、控制信号和探测信号传输,是拖曳系统的关键核心部件,在设计中若不充分考虑拖曳缆的使用状态和受到的各类载荷,加之日常使用维护不恰当,常发生拖曳缆的振动、挤压和扭伤破损、断裂、信号衰减、发热、异常接触电阻和电磁泄露等问题。非金属材料缆如尼龙、凯夫拉绳等高分子材料受光照海水腐蚀作用显著,即便使用时间和次数不多,也存在随着绳长度的增加,缆吸水后自重增大,缆的弹性系数变大,回收布放存在弹跳现象,并易发生快速蠕变现象,缆受撞击后易引发割伤和瞬断,因此不建议采用此类材料做受拉力缆。常用的承载结构均为高强度的合金钢丝搓股形成的钢丝绳作为承载缆。

按照同样拖曳速度单位长度的缆受到的水流阻力大小可分为导流拖曳缆和非导流拖曳缆;按照拖曳缆单位长度的重量可分为重装拖曳缆和轻质拖曳缆;按照拖曳缆的组合方式分为吊索分缆和铠装复合光电拖曳缆。铠装复合光电拖曳缆铠装部分起到了承载作用,而导线和光线则不承受拉力,是近年来常使用的一种缆。

早期的拖曳缆常用承载缆悬挂松弛的信号缆和电力缆进行拖曳,这种设计如图 1-6 所示,优势是便于维护和检测,如果出现电阻异常、信号传输衰减等情

况可及时更换分段连接电力信号缆线。对于承载钢索应涂抹油脂防腐。但是吊索分缆的设计需要一边布缆一边悬挂电力缆,这降低了布放效率,并且在较大的水流阻力的作用下,容易出现低频振动,在较长的放缆时容易造成空间舞动。在绞车回收时需要将钢索和电力缆脱钩,由于承拉钢缆带有连接机构,较难利用排缆机构直接回卷到卷筒上进行回收,这使得回收布放的过程较为缓慢,也使得布放长度小,拖曳系统沉降深度小,甲板操作自动化程度低下,适用于低速的浅水拖曳。

在布放机构中设计自动锁扣机构,该类型的自动锁扣形式,在一定的锁节处将承拉缆的锁环和信号缆的锁扣自动锁上,电力信号缆应当保持松弛状态,图 1-6 给出了这种吊索分缆设计。

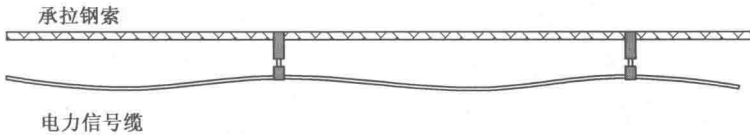


图 1-6 吊索分缆的结构

承受大载荷的缆常常在水下处于振动状态,不建议使用弹性较大的尼龙绳和凯夫拉绳作为承拉力缆,这类缆绳放大振动效应,不能长期抵抗高水平张力,容易发生断裂,在海水腐蚀和甲板高温暴晒等作用下,缆绳更容易损坏。

随着缆的制造工艺的提升和制造成本的下降,拖曳缆常采用铠装光电复合缆,这种缆将提供张力和传导信号电力的作用复合在一起,缆的外围是提供结构承载强度的铠装钢丝,内层分别是铜芯同轴电缆、光缆、信号中继等,层间采用绝缘与防水薄膜包裹,铠装缆通常涂抹保护油脂防止锈蚀。典型的拖曳缆的结构多为复合光电传输的同轴铠装缆,如图 1-7 所示,铠装结构既能够提供足够的抗拉伸强度,又能够保护光纤和电缆。这种铠装缆是由多股钢丝搓成的铠甲保护内芯的传输结构,铠甲保护结构不仅对内部传输部分起到屏蔽干扰和耐水下压力的支撑作用,而且决定了缆的最小弯曲半径,抵抗了绕过滑轮和收缆机构造成的压紧力、扭转力,起到了保护内芯的作用。

还有一种内芯是多股钢缆搓成承载结构,外层为多股传输结构的复合缆,与铠装设计相比,内芯为承载结构的缆,信号传输部分受到了水压作用,当缆在受到碰撞扭转和挤压的时候,传输电力或光信号的缆容易受损。

钢丝光电复合缆常用在低速拖曳设计中,由于布放回收效率高,可高效率地利用排缆机构回收到卷筒,自动化程度高,不仅适用于浅水拖曳,也适用于深水拖曳。

海洋拖曳过程中,铠装拖曳缆在使用中经常出现保护套、芯线绝缘破损的故

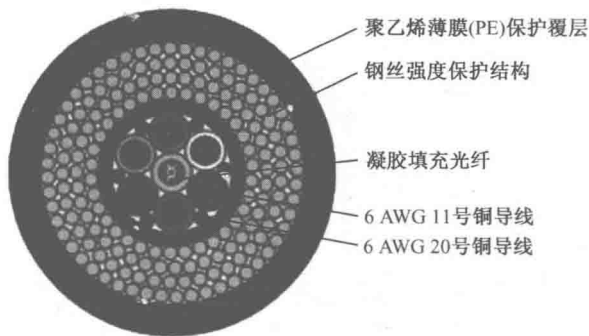


图 1-7 一种光电复合铠装缆截面

障,故障的原因有:①局部单向应力过载;②门吊点定滑轮处侧向力过载;③收放线喇叭口线接触应力集中过载;④流体力激励的周期性作用力,包括因流体激励振动导致的拖曳缆与起闭口部位反复侧向挤压,收缆机构的起闭口部位多种作用力的叠加效应等。在设计拖曳系统缆的流转路径时要注重利用保护措施消除这些效应。

在多分枝缆的拖曳系统中,缆与缆的连接需要依靠分缆的结构,运用这些分缆的结构可以避免缆的缠绕和扭绞,分缆机构的设计要便于缆绳股的编制和对缆绳的导向与保护,还要具有足够的结构强度,图 1-8 显示了一种双股缆绳分缆器设计。在使用多分枝缆进行拖曳的过程中,分缆设计要便于回收,对分枝缆通过引导绳可引导至导向滑轮,利用小型绞车容纳分枝缆。

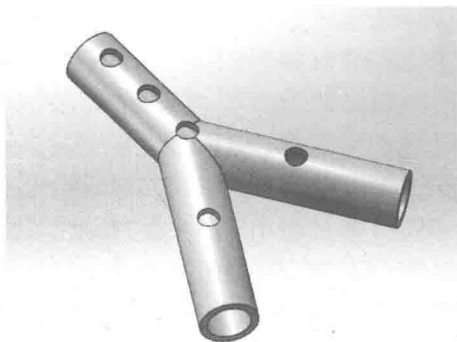


图 1-8 一种分缆器的设计

铠装光电复合型缆常制造成圆形截面,因圆形截面的缆受到水流阻力大,流体扰动作用强,在大于千米的放缆长度时,高速拖曳速度下还容易产生拖曳振动和大幅度舞动,甚至缆周围发生空化现象。在甲板收束机构和吊点滑轮处,铠装

缆因振动、拧扭而对缆内结构造成损伤。

图 1-6 显示的吊索分缆和图 1-7 显示的复合缆这两类缆索在水中受到的流动阻力大,通常较大的放缆长度达到的下潜深度较小,而且缆易受到水流激励发生摆动和振动强烈。图 1-9 给出了不同拖曳速度对应的圆形截面缆的涡致振荡运动变化规律,降低拖曳系统的稳定性能,对缆造成不可逆的疲劳损伤,严重降低拖曳缆使用寿命和可靠性。尤其在大于 20kn 拖曳速度的高速拖曳中,沿着局部缆段出现水流空化的现象,这将引发缆的高频的剧烈振动和强烈的水中噪声,长期高速拖曳使用时,缆的表面局部的空化作用将破坏缆的水密结构,对缆的安全性造成威胁。拖曳缆在浅水拖曳情况下,受水流作用呈现更强的冲击力,因受振动激励激发缆的共振,造成缆与拖曳体跳出水面形成抨击作用。

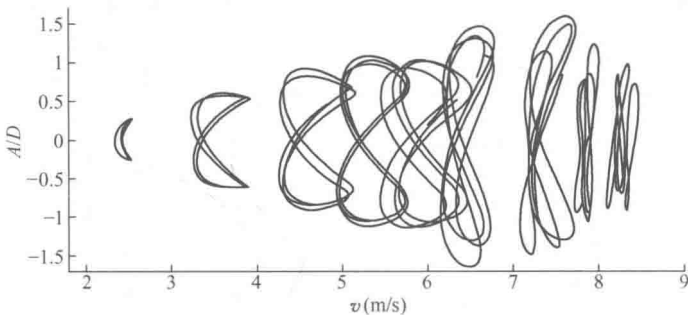


图 1-9 圆形拖曳缆振荡幅度与直径的比(A/D)随拖曳速度 v 的振荡

拖曳缆在保持高抗拉结构强度的同时需要采用低水流阻力设计。缆用导流罩是一种连接在拖曳缆上的结构,可将缆的截面规整为低阻力的流线型。安装电缆导流罩主要有两个原因:

(1) 减少法向阻力,从而达到给定电缆长度和拖速时有更大潜水深度和稳定性。

(2) 消除由涡旋脱落和边界层交替分离引起的缆振动降低缆激励噪声,也称电缆弹拨抑制(Cable Strumming Suppression)。

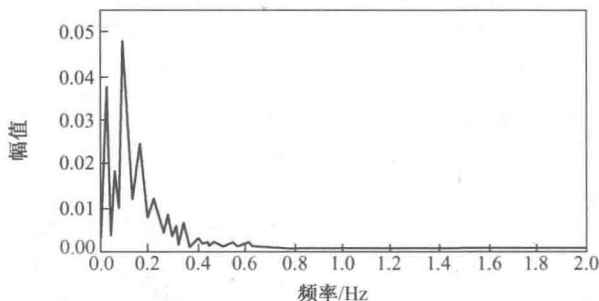
缆的导流罩有许多设计形式,这些设计都是基于降低缆受到的水流阻力、抑制缆受到的水流阻力的非定常性,典型的低阻力缆套设计有以下几种。

(1) 柔软的毛发型导流装置(Hairy Fairing)和丝带导流罩(Ribbon Fairing)用来抑制尾涡发放,此类导流装置可直接回收到绞车卷筒,避免了单独布放安装的困难,图 1-10 显示了圆形截面缆采用毛发式导流装置引起的振动功率谱的变化。

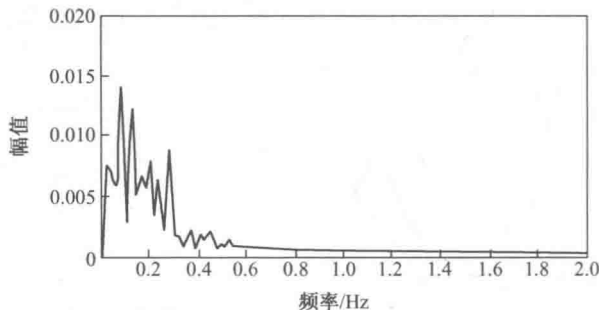
(2) 坚硬的导流罩(Hard Fairing)包括夹式导流装置(Flip-on Fairing)、包裹式柔性导流装置(Wrap/Round Fairing)以及加装了导流翼型后可以使拖曳缆

面阻力很小的流线型导流套(Aeronautical fairing)。

(3) 弹性导流羽片(Elastic Rectifying Pinna),采用橡胶导流片与橡胶包覆层制作成为鱼尾状或燕尾状,不同的拖曳缆径采用不同长度的羽片与之配合,羽片的弹性可抑制拖曳缆侧向来流形成的分离流。



(a) 光滑圆形截面缆



(b) 带毛发式导流装置缆

图 1-10 拖曳缆张力频谱

以上基于规整缆的绕流状态抑制旋涡和不稳定分离流动从而消除涡激励振动设计的拖曳缆通常称为导流缆(Faired Cable)。大多数设计都伴随着水流阻力的降低,这可在同等的放缆长度和拖曳速度下增大拖曳体的下潜深度,降低水流阻力引起的非正常水流激励。导流缆段经常安装在靠近水下端,以最大程度地发挥增大潜深的作用,这些导流装置的设计常常依赖于系列水池拖曳和风洞吹风试验的检测。

但是加装导流装置的缆会增加绞车回收和布防的复杂性。无硬质导流套的电缆可以多次缠绕在绞车鼓上,有些带有导流套的电缆只允许缠绕一次。此外,许多类型的硬质导流罩需要使用防叠圈。缆在受拉时直径变小,这会导致导流罩部分松开并且滑下电缆。而不使用防堆叠环,会使得它们在后端堆叠。从消除尾流旋涡抑制分离层造成的激励作用力出发,导流片的设计应当选用具有一