

 江苏省金陵科技出版著作基金

海洋探测装备用 水下动态铠装脐带缆

谢书鸿 栗雪松 郭朝阳 潘盼 编著

 江苏凤凰科学技术出版社



海洋探测装备用 水下动态铠装脐带缆

谢书鸿 栗雪松 郭朝阳 潘 盼 编著

江苏凤凰科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

海洋探测装备用水下动态铠装脐带缆 / 谢书鸿等编
著. — 南京 : 江苏凤凰科学技术出版社, 2017. 6
ISBN 978-7-5537-7977-5

I. ①海… II. ①谢… III. ①海洋调查设备—铠装电
缆 IV. ①P715.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 013011 号

海洋探测装备用水下动态铠装脐带缆

编 著 谢书鸿 栗雪松 郭朝阳 潘 盼
责 任 编 辑 曹婷婷
责 任 校 对 郝慧华
责 任 监 制 曹叶平

出 版 发 行 江苏凤凰科学技术出版社
出版社地址 南京市湖南路1号A楼, 邮编: 210009
出版社网址 <http://www.pspress.cn>
照 排 江苏凤凰制版有限公司
印 刷 江苏苏中印刷有限公司

开 本 718 mm×1 000 mm 1/16
印 张 15.5
插 页 4
字 数 248 000
版 次 2017 年 6 月第 1 版
印 次 2017 年 6 月第 1 次印刷

标 准 书 号 ISBN 978-7-5537-7977-5
定 价 68.00 元(精)

图书如有印装质量问题,可随时向我社出版科调换。

江苏省金陵科技著作出版基金资助项目

致读者

社会主义的根本任务是发展生产力,而社会生产力的发展必须依靠科学技术。当今世界已进入新科技革命的时代,科学技术的进步已成为经济发展、社会进步和国家富强的决定因素,也是实现我国社会主义现代化

的关键。

科技出版工作肩负着促进科技进步、推动科学技术转化为生产力的历史使命。为了更好地贯彻党中央提出的“把经济建设转到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来”的战略决策,进一步落实中共江苏省委、江苏省人民政府做出的“科教兴省”的决定,江苏凤凰科学技术出版社于1988年倡议筹建江苏省科技著作出版基金。在江苏省人民政府、江苏省委宣传部、江苏省科学技术厅(原江苏省科学技术委员会)、江苏省新闻出版局负责同志和有关单位的大力支持下,经江苏省人民政府批准,由江苏省科学技术厅、凤凰出版传媒集团(原江苏省出版总社)和江苏凤凰科学技术出版社共同筹集,于1990年正式建立了“江苏省金陵科技著作出版基金”,用于资助自然科学范围内符合条件的优秀科技著作的出版。

我们希望江苏省金陵科技著作出版基金的持续运作,能为优秀科技著作在江苏省及时出版创造条件,并通过出版工作这一平台,落实“科教兴省”战略,充分发挥科学技术作为第一生产力的作用,为建设

更高水平的全面小康社会、为江苏的“两个率先”宏伟目标早日实现，促进科技出版事业的发展，促进经济社会的进步与繁荣做出贡献。建立出版基金是社会主义出版工作在改革发展中新的发展机制和新的模式，期待得到各方面的热情扶持，更希望通过多种途径不断扩大。我们也将实践中不断总结经验，使基金工作逐步完善，让更多优秀科技著作的出版能得到基金的支持和帮助。

这批获得江苏省金陵科技著作出版基金资助的科技著作，还得到了参加项目评审工作的专家、学者的大力支持。对他们的辛勤工作，在此一并表示衷心感谢！

江苏省金陵科技著作出版基金管理委员会

序言一

推动“深海进入、深海探测、深海开发”

我国经济的发展将越来越多地依赖于海洋。“一带一路”战略的提出,必将大力推动 21 世纪海上丝绸之路战略的实施。国家将发展海洋经济和海洋科技提升到新的战略高度,海洋产业成为培育和发展战略性新兴产业的重要领域。实施建设海洋强国的重大部署,对推动经济持续健康发展,对维护国家主权、安全、发展利益,对实现全面建成小康社会,进而实现中华民族伟大复兴都具有重大而深远的意义。

未来的 5~10 年是我国海洋科技实现战略性突破的关键时期,在认知海洋、支撑海洋经济和海洋事业发展等方面将会取得重大进步,机遇与挑战并存。海洋开发进入立体开发阶段,在深入开发利用传统海洋资源的同时,不断向深远海探索战略新资源和能源,大力拓展海洋经济发展空间。海洋科技向“大科学”、高技术体系方向发展,进入大联合、大协作、大区域研究阶段;海洋调查步入常态化和全球化,海洋观测进入立体观测时代,并向实时化、系统化、信息化、数字化方向发展。海洋科技向现实生产力转化的速度加快,不断催生海洋新兴产业。

建设海洋强国,装备必须先行。我国自 20 世纪 60 年代就开始开展海洋探测装备技术研究,为提高海洋认知、感知能力,研制和开发了各种

类型的水下探测技术与装备,包括有缆遥控潜水器(ROV)、载人潜水器(HOV)、无缆自治潜水器(AUV)、拖曳潜水器(DTV)等系列潜水器,以及电视摄像电动抓斗、海底钻机等。近年来,我国围绕提高近海资源利用水平和深海战略性资源的储备,研发了一批重大技术和装备,促进了海洋技术从近浅海向深远海的战略性转移。比如,我国自行设计、自主集成研制成功7 000 m级研究型“蛟龙号”深海载人潜水器;正在研制国产化4 500 m级作业型载人潜水器;“海马号”无人遥控潜水器的成功研制,标志着我国已具备自主设计制造和应用4 500 m级无人潜水器的能力;一批近海、深水油气田和大洋海底固体矿产资源勘探开发关键技术与重大装备已投入应用;3 000 m半潜式钻井平台等大型海洋工程装备研制取得突破;12 缆、16 缆物探船(可拖带12条、16条采集电缆的地球物理勘探船)获得突破,打破了国外技术垄断等。

要实现海底资源开发,必须以海洋资源的探查和有效检测技术为保证,需要技术含量很高的深海装备。深海装备通用与配套技术包括深海设备通用部件与技术、深海导航定位及通信与能源供应系统、甲板收放系统、升沉补偿装置、动态铠装脐带缆、干/湿插拔水密接插件、深海浮力材料等。这些深海通用产品的工艺水平及配套程度直接影响和制约着我国深海装备研发能力的提升与深海高技术产业的发展。

在国家科技部“十二五”国家高技术研究发展计划(“863 计划”)的支持下,我国系统部署了系列“深海通用技术与产品研制”项目研究。本书作者所领导的团队承担了“深海 ROV、拖体等设备用铠装缆技术”等课题。课题研制的相关产品经过了实际海试,产品性能达到国外同类产品水平。后续配套多台 ROV 成功进行了工程应用,证明我国已经具备了该类产品的自主研发能力,对于打破国外技术垄断、实现产品替代进口,推动我国深潜器等海洋装备技术应用和经济发展具有重要意义。

“十三五”期间,我国海洋科技工作将进一步聚焦国家重大需求,加快实施深海探测战略,加快实现重大科学问题的原创性突破,为认识海洋提

供理论技术支持;加快核心关键技术的突破,推动“深海进入、深海探测、深海开发”;加快高新技术成果产业化,引领海洋经济提质增效和空间拓展;加快科技成果集成创新,支撑海洋生态文明建设和海洋安全保障。

本书将有效指导国内线缆制造企业研制、生产该类型产品,将有利于规范和引领该产品行业发展,促进国内企业在该产品的结构设计、材料应用、制造工艺和装备应用等方面的创新,建立和完善相关检测方法,打破国外技术垄断,为我国海洋装备的发展提供技术支持和产品配套。本书也将有效指导 ROV 等深海探测设备研制,以及指导工程应用单位进行选型和使用,促进我国深海通用设备的国产化、产业化、谱系化,大大提升我国参与国际海洋竞争的能力,加速我国向更深、更远的海洋进军。

中国工程院院士 封锡权

2016年12月于中国科学院沈阳自动化研究所

序言一

我国是一个海洋大国,拥有广阔的海域,海岸线长达 1.8×10^4 km,有6 500 多个大小岛屿。海域资源丰富,种类繁多,包括海洋生物、石油天然气、固体矿产、可再生能源、滨海旅游等,开发潜力巨大。海洋科学技术和装备的发展也紧密关系到我国海洋权益、环境保护、经济发展和国家安全等核心利益。

要研究海洋科学、探查和开发海洋资源、保障海洋环境和疆域安全,首先要研制和开发各种水下探测技术与装备。各类系缆潜水器,如有缆遥控潜水器(ROV)、拖曳潜水器(DTV)、海底钻机和电视摄像电动抓斗等,都是主要的水下作业装备。这些装备都是通过动态铠装脐带缆与水面作业母船吊放和控制系统连接。说其是“动态”的,是因为这种缆不同于静态铺设缆,需要在高载荷下在绞车上反复盘转,在水流作用下产生阻力和激震运动,在母船升沉运动下产生动张力。说其是“脐带”,是因为要通过这种缆向水下设备传输动力、控制和反馈等信号,是水下装备的一条“生命线”。

研制深海装备动态铠装脐带缆需解决诸多关键技术,包括低密度高强度铠装、光纤和导体材料技术、小直径高密度耐压结构技术、高电压高环境压力绝缘技术、纵向密封和连续大长度成缆工艺技术等。之前,这种产品多被国外垄断,已成为我国水下装备发展的瓶颈技术之一。因此,国

家“863 计划”部署了“深海 ROV、拖体等设备用铠装缆技术”研究项目。本书作者所领导的研发团队在对国内外相关公司、相关产品、相关用户做了大量调研、分析和研究工作的基础上,经过多年努力,成功研制了大深度无人遥控潜水器和拖体等设备用铠装缆,并通过了海上试验和工程应用。本书结合该项目的研究成果,系统全面地介绍了海洋探测装备用动态铠装脐带缆的工作环境、性能特点、结构设计、材料选择、制造工艺、使用要求和性能检测等技术。

本书作者长期工作在线缆行业科研第一线,具有坚实的理论基础和丰富的实践经验,是我国线缆行业的知名专家。他将多年的工作心得总结成了一本专业著作,这也是国家“863 计划”相关项目的补充研究成果。该书是国内第一本专业介绍大深度水下动态铠装脐带缆的著作,虽然涉及的研究内容 and 应用领域相对较窄,但起到了重要的补缺作用,填补了相关专业文献的空白。该书将对相关技术人员和用户了解深海动态铠装脐带缆的设计原理、加工工艺、测试试验方法和配套附件等技术具有重要的参考价值,也将对我国进一步研制全海深 ROV 脐带缆具有重要的指导意义。为本书写序,我也收获了一份荣誉和提前学习的机会,不胜荣幸。

任 平

2016 年 12 月 12 日于上海交通大学

前言

“863 计划”海洋技术领域的科学技术宗旨是坚持军民融合,以挺进深远海、深化近浅海为原则,以维护国家海洋战略利益和培育海洋新兴产业为导向,以保护海洋国土和资源、形成海上技术作业能力、促进前沿科学与高技术的发展为目标。根据《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》中优先主题“深海作业技术”“基础原材料”的重要研究内容,“863 计划”海洋技术领域“十二五”战略研究成果将“深海运载技术与重大装备研发”作为发展重点。

作为“863 计划”海洋技术领域“十二五”首个启动项目的“深海通用技术与产品研制(I 期)”主题项目之深海 ROV、拖体等设备用动态铠装脐带缆是重要的深海通用技术之一。2011 年,江苏中天科技股份有限公司作为牵头单位,联合上海电缆研究所和广州海洋地质调查局共同承担了“863 计划”“深海 ROV、拖体等设备用铠装缆技术”课题(编号:2011AA090605)。课题目标是突破水深 500 m 级 ROV 用非金属中性缆、水深 1 000 m 拖体用金属铠装缆和水深 4 500 m 级 ROV 用金属铠装缆的共性关键技术和制造工艺,填补国内空白。通过样品的研制,形成 ROV 用非金属中性缆、拖体用金属铠装缆和 ROV 用金属铠装缆的设计规范、制造工艺和检验标准,建设检测试验平台,开展规范化海上试验。

海洋探测装备用动态铠装脐带缆技术与产品已广泛应用于水下工程机械、作业器具、水下照明、电力分配系统、潜水装备器具(潜水钟、潜水头

盔、电热服)、潜水器、锚系船泊设施等领域的电力输送、电/液控制、信号传送等诸多方面,对我国深海潜水装置、ROV、深海作业的发展有着重要的意义。而水下 ROV 和拖体是支撑探测和开发海洋资源,开展海洋科学研究、进行海洋工程作业的重要技术手段和装备,水下 ROV、拖体等设备用动态铠装脐带缆是连接支持母船与水下 ROV 和拖体的关键组成部分。长期以来,水下 ROV 和拖体等设备用动态铠装确定缆一直依赖进口,较大程度制约着我国海洋技术的发展。自主研发水下 ROV、拖体等深海探测装备用动态铠装脐带缆技术并形成深海作业能力,不仅能为我国海洋技术领域提供可靠的、系列化产品,打破国外技术垄断,完全替代进口产品,同时可以突破水下 ROV、拖体等海洋探测设备与支持母船的关键连接载体长期受制于国外和国内产业配套能力弱的瓶颈,为我国水下 ROV、拖体等海洋探测装备用动态铠装脐带缆的国产化和产业化奠定坚实的技术基础。由于动态铠装脐带缆涉及机械加工、水下通讯、材料、电子电力、化工等多个领域,发展动态铠装脐带缆技术还将对我国多领域技术的发展起到积极的带动、辐射和示范作用。同时还将促进我国其他深海通用技术与产品研制,为我国海洋工程、海洋仪器和海洋装备的发展提供自主技术支撑和配套。

本书是集体智慧的结晶,是“863 计划”科研课题成果之一,全书成果是全体参研人员共同所有的。各位作者分别从海洋探测装备用动态铠装脐带缆的技术来源、结构、材料、性能、工艺、测试、应用等视角执笔撰写,具体分工为:谢书鸿(第 1、2、6 章)、栗雪松(第 3、5、7、9 章)、郭朝阳(第 8 章)、潘盼(第 4 章),全书由谢书鸿统稿完成。

我们特别致谢上海电缆研究所高欢教授级高级工程师、徐晓峰博士,他们为本书撰写的前期资料准备、部分技术观点提供了许多帮助,贡献了许多智慧,付出了辛勤的劳动。他们是本书集体作者中未署名的一员。

我们感谢国家科技部“863 计划”海洋技术领域办公室,是他们的支持,我们才能荣幸承担该国家级课题;我们感谢江苏中天科技股份有限公司

司、中天科技海缆有限公司,为课题的研究和本书的写作提供平台,并提供出版支持;我们感谢江苏省金陵科技著作出版基金的资助,感谢江苏凤凰科学技术出版社为本书的出版提供的支持。

我们感谢封锡盛院士、任平研究员、毛庆传教授级高级工程师、曹婷婷编辑等对本书提出的中肯的修改意见。尤为感谢封锡盛院士、任平研究员倾情作序,拙作为之生辉。

谢书鸿

2017年4月

目录

1 海洋开发与水下探测装备	001
1.1 认识海洋	002
1.2 开发海洋	004
1.3 水下机器人系统	008
1.3.1 水下机器人	008
1.3.2 ROV 发展历程	010
1.3.3 ROV 系统组成	013
1.3.4 水下机器人发展趋势	018
1.4 水下拖曳系统	019
1.4.1 水下拖曳系统的研究	019
1.4.2 典型水下拖曳系统介绍	020
2 动态铠装脐带缆技术	023
2.1 技术发展现状	025
2.2 技术发展趋势	027
2.2.1 向“大水深”迈进	027
2.2.2 结构单元更加复杂	027
2.2.3 信号传输带宽更大	028
2.2.4 结构尺寸小型化	028
2.3 产品结构分类	028
2.3.1 按使用环境分类	029

2.3.2 按 ROV 使用功能分类	030
2.4 产品基本功能	031
2.4.1 电能传输	032
2.4.2 信号传输	032
2.4.3 机械承载	033
2.5 产品基本设计	033
2.5.1 设计分析技术	034
2.5.2 金属铠装缆结构设计技术	035
2.5.3 非金属中性缆结构设计技术	036
2.6 工程应用及使用环境	039
2.6.1 工程应用领域	039
2.6.2 工程使用环境	041
3 结构及功能设计	043
3.1 光纤单元设计	044
3.1.1 光纤	044
3.1.2 不锈钢管	047
3.1.3 塑料护套	047
3.2 动力单元设计	048
3.2.1 导体	049
3.2.2 绝缘层	049
3.3 通信单元设计	050
3.3.1 直流电阻	051
3.3.2 电容	052
3.3.3 特性阻抗	052
3.4 单元线芯成缆设计	053
3.5 内护层设计	054
3.6 铠装结构设计	054
3.6.1 非金属铠装承力元件	054
3.6.2 金属铠装承力元件	055

4 静态、动态机械性能设计	061
4.1 静态机械性能	062
4.1.1 破断力	062
4.1.2 安全工作载荷	063
4.1.3 弯曲半径	064
4.1.4 刚度	067
4.1.5 有限元法分析计算	072
4.2 环境载荷	081
4.2.1 洋流	081
4.2.2 风	083
4.2.3 波浪	084
4.3 动态响应	091
4.3.1 莫里森方程	091
4.3.2 涡激振动	094
4.3.3 基于 OrcaFlex 软件的计算分析	096
4.4 动态疲劳性能	103
4.4.1 疲劳载荷	103
4.4.2 疲劳失效	104
4.4.3 疲劳分析流程	106
5 原材料特性	111
5.1 光纤材料	112
5.1.1 光纤的组成	112
5.1.2 光纤的主要技术特性	112
5.1.3 光纤的分类	117
5.2 导体材料	118
5.2.1 铜及铜合金	118
5.2.2 铝及铝合金	120