

[苏] В. С. 亚斯特列鲍夫 М. Б. 依格纳季耶夫  
Ф. М. 库拉科夫 В. В. 米哈依洛夫

# 水下机器人

海洋出版社

P715.5

Y04

233451

# 水下机器人

(苏) B. C. 亚斯特列鲍夫 M. B. 依格纳季耶夫 著  
Ф. М. 库拉科夫 B. B. 米哈伊洛夫

关 信 刘佐猷 李秀云 张海泉 译

李俊朋 贺清扬 董文成 校



海洋出版社

1984年·北京

DLL 61/12  
内 容 简 介

本书是苏联“海洋开发技术丛书”的一种。书中阐述了利用信息计算系统和机器人进行世界海洋开发研究的任务，分析了海洋开发研究的方法，列举了建立自动化系统和水下机器人的例子，剖析了机器人活动的任务以及母船长时间保持在一点的动力定位系统，讨论了主从式水下机器人—机械手和带计算机的机器人—机械手的结构、算法及保障系统，最后指出了水下机器人的发展前景。

本书可供研究、设计、建造与使用潜水器和水下机器人的科技人员阅读，也可供高等工科院校海洋工程、船舶工程、自动控制工程等有关专业的教师和学生参考。

Подводные Роботы

В. С. Ястребов М. Б. Игнатьев

Ф. М. Кулаков В. В. Михайлов

Изд. «Судостроение» 1977г.

水 下 机 器 人

(苏) В. С. 亚斯特列鲍夫 М. Б. 依格纳季耶夫 著  
Ф. М. 库拉科夫 В. В. 米哈伊洛夫

关 信 刘佐猷 李秀云 张海泉 译

李俊朋 贺清扬 董文成 校

---

海 洋 出 版 社 出 版 (北京市复兴门外大街)

新华书店北京发行所发行 北京通县兔子店印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32

印张: 13 字数: 250000

1984年12月第一版

1984年12月第一次印刷

印数: 2,000

---

统一书号: 13193·0239

定价: 2.40 元

## 作 者 的 话

系统地整理有关机器人的现有全部资料，阐述水下机器人新理论的某些要点，本书做了初步尝试。书中分析了采用水下机器人进行海洋考察的可能性和方向，系统地整理了二百多篇文献资料，十分详细地探讨了水下机器人的结构，介绍了水下机器人子系统数学模型的基本知识。

本书对各种新的控制理论(如监控方法)给予了极大的注意，并根据遥控潜水器和机器人在海洋实际工作的结果做了介绍。通过实际的控制结构和模拟实验的实例说明了监控方法的理论。所介绍的水下机器人机械手的控制方法均以极值离散算法和极值连续算法为基础。

最后，还指明了海洋开发技术手段的主要发展方向。

## 序 言

昨天，“机器人”这一概念还是科学的幻想，似乎距离实际仍然十分遥远，可是今天由于在造制技术系统方面积累了经验，已能够研制出包括水下机器人在内的各种机器人了。

水下机器人的概念里含有不同于现有的“机器”、“机械”和“自动系统”等概念的新内容。它是一种具有内部记忆能力并能独立判断周围环境的综合控制装置。

在机器人现时的发展阶段中，最好是把它们按代分类。通常把水下机器人分成三代。第一代，即最原始的一代，实际上包括全部遥控的、拖曳的和载人的潜水器，虽然严格地说，这些遥控的和载人的潜水器都是手动控制的。可以认为，目前第一代水下机器人的发展和完善的过程正在结束。

当前，很多国家已开始研究制造第二代水下机器人的系统和器件。这种第二代水下机器人的根本特点是：

控制系统采用递阶结构；

具有计算控制装置；

具有记忆能力；

能不断地校正外部环境和内部状态的模型；

可以学会各种基本技能；

操作人员能够对水下机器人的工作过程进行高级的战略干预和战术干预。

由此可见，第二代水下机器人的特点是具有自适应能力，可以独立完成全部纯机械的操作，特别是令人厌倦的操作；不过这时水下机器人是在操作人员的指挥下工作的，操作人员

要经常对机器人的活动进行战略的和战术的干预。具有监视控制的机器人就属于第二代水下机器人。操作人员的控制任务只是指示目标和下达简单的任务。水下机器人独立地移向目标并进行各种操作。其最优运动参数，各驱动装置的工作顺序等，都是机器人根据预学习以及不断分析外界条件及其内部状态参数确定的。

第三代水下机器人是一种具有人工智能的系统。对这种水下机器人的控制已减少到最低限度。操作人员将总的任务简单地下达给机器人，与战术甚至与战略有关的全部任务，都由水下机器人自行完成。它具有庞大的记忆能力，可以分析和识别外界的形态，并在外界变化时，可以自由地决定自己的行动方向。这种水下机器人可以适应环境，变换动作，积累与外界交互的经验，并借助这种经验去完成给定的作业。

观察、定位、传感等系统相互联系在一起，由逻辑-计算装置组成闭环系统。这样就会在水下机器人的存储器中建立一个外部世界的内部模型。这种水下机器人可以完成实际上是无穷的各种各样的连续动作，并且几乎能在瞬间变换自己的程序。

但这是将来的事情。目前所面临的是解决制造水下机器人的很多技术问题以及一些相当重要又很复杂的带方法性的问题。

无论是第一代水下机器人，还是第二代水下机器人，目前至关重要的是尽量扩大其在海洋考察中的应用领域。揭示出那些用普通方法不能完成或者很难完成的全部重大课题，就意味着为水下机器人的发展和完善找到了正确的、最适宜的方向。

第一，目前已存在毋庸置疑的水下机器人的应用领域，即抢险救生作业和水下工程，在完成这些作业当中水下机器人

总是最有成效的。

第二,在海洋学研究领域,采用水下机器人,比传统的水面船只进行海洋研究的方法有很多优点。

水下机器人能够:

#### 1. 直接观测所研究的现象。

由于海洋工作者是在水面船只上工作,很难知道放入水下的仪器或采样装置的精确位置,而关于海洋性质的大部分结论仅仅是根据为数不多的测量或者所抓取的试样做出的。

#### 2. 优选试样。

海洋工作者有了像机械手这样的手段之后,就从一个被动的对水下隐蔽现象的观察记录者变成一个主动的研究者,因为这时他可以对试样进行选取或放弃、取出或保存。

#### 3. 在海底安装测量记录仪表并检查其工作情况。

由于潜水器的操作是可控的,所以能准确地海底安装仪器并对其进行维护。潜水器也可以用来安装和定期检查从船上投放的固定式常规仪表的工作情况,或者通过标准测量装置进行观测。

#### 4. 综合观测。

通过照相、直接观测、测定环境参数和采样等手段,潜水器的确可以同时海洋现象进行综合考察。

除了水下机器人的上述主要优点外,还不应忘记诸如不受水面波浪干扰从而提高深水测量精度等这样一些其它优点。

为了在海洋的考察中最合理地利用水下机器人,显然,必须仔细地分析和系统地研究那些载人的、遥控的和拖曳的潜水器对海洋进行各方面考察的情况。首先,这种分析可以使我们确定这些手段的基本战术性能,并评价所取得的结果。了

解了这一点以及水下机器人的技术性能之后，就能比较容易地指出它的发展方向。此外，通过这种系统的分析和研究，可以对所积累的资料进行全面评价，从而对今后的研究工作提出切合实际的建议。



# 目 录

作者的话.....	v
序言.....	vi
<b>第一章 海洋的水下考察及其任务和方法.....</b>	<b>1</b>
§ 1. 对采用潜水器考察海洋的分析.....	1
§ 2. 水下机器人的分类.....	14
§ 3. 水下机器人在海洋考察和水下工程中的应用前景.....	21
§ 4. 水下机器人的保障手段.....	30
<b>第二章 水下机器人的结构.....</b>	<b>35</b>
§ 5. 水下机器人的总体布置.....	35
§ 6. 水下机器人的移动装置.....	41
§ 7. 水下机器人的机械手.....	53
§ 8. 水下机器人的传感系统和外界信息的处理.....	68
§ 9. 操作者与水下机器人之间的通信系统.....	91
§ 10. 水下机器人的动力系统.....	105
<b>第三章 水下机器人主要系统的数学模型.....</b>	<b>108</b>
§ 11. 浮游机器人的动力学模型.....	109
§ 12. 水下机械手的动力学模型.....	120
§ 13. 水下步行机器人的数学模型.....	134
§ 14. 拖缆的空间动力学模型.....	142
§ 15. 解决水下机器人动态控制问题的方法.....	160
<b>第四章 水下机器人的控制系统.....</b>	<b>174</b>
§ 16. 生物体运动的构成原理.....	174

§ 17. 水下机器人控制系统分级结构的分析 .....	178
§ 18. 水下机器人是带冗余度的多目标系统 .....	182
§ 19. 水下机器人—机械手的控制级 .....	186
§ 20. 最低级操作空间的结构 .....	191
§ 21. 水下机器人移动控制系统的结构 .....	207
§ 22. 对水下机器人给定运动 .....	212
§ 23. 利用冗余变量法建立步行水下机器人的控制 算法 .....	224
§ 24. 预先测算机器人航线的算法 .....	229
<b>第五章 水下机器人的监视控制</b> .....	240
§ 25. 形成运动的标准指令及其形式化 .....	242
§ 26. 水下机器人的外界模型 .....	259
§ 27. 水下机器人机械手执行标准指令时控制任务 的提出 .....	265
§ 28. 多级控制模型 .....	271
<b>第六章 水下机器人机械手基于极值离散算法的控制方     法</b> .....	282
§ 29. 失调泛函的性质 .....	282
§ 30. 泛函的极值算法 .....	300
§ 31. 指令信息和外界信息的处理算法 .....	320
§ 32. 外界指令信息的输入算法 .....	330
§ 33. 战术控制级的程序 .....	335
§ 34. 最低控制级控制指令的直接构成法 .....	347
§ 35. 抓取空间任意定向物体的准备操作 .....	358
<b>第七章 水下机器人机械手基于极值连续算法的控制方     法</b> .....	367
§ 36. 平稳控制问题的等价微分方程的综合 .....	368
§ 37. 具有机械连接的对象移动操作 .....	382

§ 38. 非平稳控制问题的有效微分方程的综合 .....	385
§ 39. 使用求极值连续算法时战术控制级的结构	
特点.....	389
结束语.....	397
参考文献.....	398

# 第一章 海洋的水下考察 及其任务和方法

## § 1 对采用潜水器\*考察海洋的分析

海洋工作者进行直接观察的愿望，促进了潜水器的实际应用。1884年法国自然科学家密尔恩·爱德华教授第一次潜入了西西里岛附近的海域进行水下考察。

二十世纪三十年代，苏联生物学者采用潜水装具对渔业区进行了科学观测。1927年地质学家 M. B. 科列诺夫教授，在塞瓦斯托波尔市附近乘钟形潜水装置潜入 45 米水深处，进行观测和搜集土样。

在此期间，意大利、法国和美国也都进行了水下考察。美国威廉·比布教授提议，把学者潜海考察载入史册。他本人曾在百慕大群岛乘潜水球深潜到 960 米处。

从五十年代起，对水下考察的兴趣日渐增加。目前全世界已有 100 多艘考察用的潜水器。1957 年美国首次利用“的里雅斯特”号深水潜水球进行了海洋地质考察，后来建造的其他潜水器也进行了类似的考察。

采用遥控潜水器进行海洋考察，只是最近几年才开始的。美国的“海蜂”号自动遥控潜水器<sup>[1]</sup>和拖曳式遥控潜水

---

\* 关于载人潜水器的详情，可参阅 R. 法兰克·布什毕著的《载人潜水器》，中译本由海洋出版社 1982 年 6 月出版。有关遥控潜水器的详情，可参阅同一作者编写的《遥控潜水器》，中译本由海洋出版社 1983 年出版。——编者注

器<sup>[92]</sup>，完成了环境参数的大量测量工作和绘制海底地图的作业。偶尔也采用带机械手的遥控潜水器进行考察。例如苏联于1972—1974年使用“蟹”号遥控潜水器在地中海和太平洋进行了地质考察<sup>[59]</sup>。美国曾利用“科沃”(CURV)号遥控潜水器进行生物考察<sup>[53]</sup>。从1970年起，美国经常采用“腊姆”(RUM)号海底遥控潜水器进行海洋考察<sup>[77]</sup>。在海洋考察中，最常用的是无缆载人潜水器。应当指出，载人潜水器和无人潜水器的性能是极其相近的。无论哪一种潜水器都能进行测量，采水样和土样，安装海底测量仪器并检查其工作等。它们共同的性能是：

- (1) 直接观测；
- (2) 选取试样进行安装；
- (3) 在海底和深海中有目的地移动；
- (4) 通过综合测量仪表记录环境参数；
- (5) 保证运动轨迹平稳；
- (6) 在作业对象或海底某点的上方进行动力定位。

无论是在母船动力定位的条件下(如“格·挑战者”号船)<sup>[62]</sup>，还是在通信电缆上采用中间锚<sup>[59]</sup>，均能保证遥控潜水器的动力定位。

但是在载人潜水器和遥控潜水器之间还是有区别的。

遥控潜水器由母船供电，在水中停留的时间不受限制(母船保持不动)；而载人潜水器，则要受到限制。

遥控潜水器由于与母船有电缆连结，所以其考察区域是有限的；而无缆载人潜水器则没有这种限制。

遥控潜水器的体积小，所以其采样数量比载人潜水器少。

遥控潜水器比重量大的载人潜水器机动性好，并能在狭窄区域作业。

研究人员在载人潜水器中取得的信息量，多于遥控潜水

器因受通信电缆容量的限制而传输到母船上的信息量。

此外,遥控潜水器对所考察环境的影响较小。

为了清楚地了解现有潜水器应用的大量资料,必须对这些资料进行适当的分类,然后按主要类目进行整理分析。我们认为,可以把应用领域和作业条件作为这种类目。

## 1. 应用领域

潜水器曾用来进行海洋和渔业考察、石油勘探、抢险救生和 underwater 工程。因此,评价潜水器在上述每个领域中的应用比例是十分重要的。在伍兹霍尔海洋研究所工作人员 R. D. 巴拉德和 K. O. 埃默里的著作中<sup>[42]</sup>,引证了某些间接资料,但从这些资料中还是可以得到相互比较的评价。作者仅限于把有关载人的潜水器的报道数量,作为评价其应用范围的标准。其结果为:在 346 份报道的文献中,潜水器用于水文地质考察的有 89 份;用于水生物考察的有 74 份;用于水声考察的有 34 份;用于海洋物理考察的有 19 份;用于地球物理考察的有 14 份;用于渔业考察的有 45 份;用于其它方面的有 74 份。

上述分析<sup>[42]</sup>表明:潜水器最常应用的领域是水文地质考察和海洋生物考察,因为进行这些作业一般不需要专门的仪器,只利用一些最常用和熟练掌握的装置,如机械手、照像机、摄影机就行了,并且不要求潜水器长时间在某一点悬停、准确的定位和保持稳定等。渔业考察大体上也可以使用这样一些仪器。

在进行水声考察时,必须采用复杂的专门仪器。

进行海洋和地球物理考察的条件是:在潜水器上需装有专用的高精度测量仪表;保证潜水器高度稳定、能在空间一点动力定位和空间定向等。

通过分析表明,装有专门测量仪表并能保证高精度测量

环境参数的潜水器是很少的。

下面我们讨论一下潜水器在其工作期间都完成了哪些考察,同时评价所取得的数据的重要意义。

### 水文地质考察

潜水器曾完成:视觉观测,记录海底微地形及其结构;

借助仪器绘制海底地图;

选择土样和岩石样品。

在各种地形复杂的海区近距离绘制的海底地图都是很详细的<sup>[45]</sup>。通常还顺便考察了在海底积存的岩石的成份、结构和物理化学性质。最常用的方法是通过电视装置经过水密窗观测海底,然后把景象记录在磁带录像机上(或者用立体照相和拍摄电影)。进行这种考察时,常常用机械手和小管以及钻孔器选取土样和基岩<sup>[66]</sup>。

例如美国“阿鲁明诺”号潜水器,曾在1,200米深海搜集铁锰结核样品和铜镍钴矿石层样品<sup>[72]</sup>。苏联“蟹”号遥控潜水器,曾在太平洋夏威夷群岛和第勒尼安海的海底火山处搜集土样。有些潜水器还装有基岩破碎器<sup>[76]</sup>。

潜水器对考察深海峡谷特别有效。已经查明,从海面考察深谷时取得的资料,与直接观测所取得的有很大差异。例如在美国西海岸考察拉合里和斯克里普斯深谷的过程中,查明了一些用间接方法考察而无法确定的特点<sup>[68]</sup>。成功地考察了海底的局部不正常情况、海底沉积物的性质及其分布特点。还通过潜水器考察了斜坡的区域地层,观察和评价了在斜坡上产生的动态过程。这种方法还可以用来考察水流和混浊流由潮汐沿深谷底部带出海洋的动态情况。例如,已经查明海底的鳞波痕迹就是水流作用的结果。开展海洋深海斜沟的考察是很有意义的,但也是困难的。美国的“的里雅斯特”号和法国的“阿基米德”号深水潜水器都进行过这种考察。此

外还考察了海底高原(布莱克高原)寻找锰、磷矿床;考察盆地,调查它们的发源地;测定了大陆架外缘的暗礁堤的性质<sup>[42]</sup>。近年来曾采用潜水器勘探海底天然气<sup>[47]</sup>。还在北极地区利用潜水器进行了类似的考察<sup>[44]</sup>。

#### 海洋生物考察

借助潜水器进行了下述考察:

对海底生物形态分布进行了视觉观察和仪器测定;

考察和选取了浮游生物和海底生物标本;

对生物音响进行了考察。

这些考察和水文地质考察一样,也主要是采用视觉观测方法,借助电视装置通过水密窗进行观察,然后记录在磁带录象机上,以及使用立体照相和拍摄电影等。参与水生物考察的主要潜水器有:美国的“深海星-4000”号,加拿大的“南鱼座”号,美国的“本·富兰克林”号和“潜筒”号。例如“深海星”号曾对深海海底生物拍摄了电影<sup>[50]</sup>，“本·富兰克林”号在海底考察了海星的活动习性。根据观测的结果,编制了海星的随时间变化的迁游图<sup>[42]</sup>。

苏联的“蟹”号遥控潜水器曾在地中海海底火山顶部搜集植物和海底生物的标本。

美国采用“鲁法斯”(RUFAS)号拖曳式潜水器进行了极为有意义的综合性生物考察。考察了佛罗里达沿海的多礁区域的结构、软体动物、海龟、螃蟹的分布情况,绘制了这些生物的详细分布图,并且在观测站拍摄了大量的彩色照片。另一遥控潜水器“科沃”号搜集了海底生物标本<sup>[53]</sup>。“潜筒”号和“阿鲁明诺”号考察了软体动物、海星、蛇尾纲动物的群体。

“本·富兰克林”号在浮游过程中,考察了潜水器的壳体、水密窗和仪器传感器上生长海生物的密度<sup>[85]</sup>,并且调查了微生物的消音层。通过浮游考察证明,在墨西哥湾暖流作用区,



没有这种消音层<sup>[71]</sup>。

日本“深海”号所进行的对浮游生物分布带的考察具有重要意义。浮游生物是在该潜水器作水平和垂直运动的条件下捕捞的。

“南鱼座”号和“本·富兰克林”号曾多次记录海中自然生物的声音。潜水器自身的声音是极小的，所以这一考察结果是极其有用的<sup>[51]</sup>。

### 海洋物理考察

潜水器主要用于考察靠近海底水层的循环情况，其中包括水交换过程对海底的影响<sup>[42]</sup>。对深水水流、速度、盐度和温度等参数的局部变化情况的考察，具有十分重要的学术价值。如果用水面船只考察，这些资料是得不到的。“本·富兰克林”号在浮游过程中曾多次测定涡流的特性<sup>[55]</sup>。

在海底地势交错区域，通过用着色物质拍摄电影，考察海底水流及其对海底表面的作用是很有意义的<sup>[63]</sup>。

“深海星-4000”号考察了海底地形复杂区域里，因海底水流变化而形成的悬浮沉积物的分布情况。曾利用“腊姆”号遥控潜水器(美国)和“南鱼座”号载人潜水器在海底安装流速测量传感器，就地进行高精度测量。例如利用“本·富兰克林”号测出了墨西哥湾暖流的准确流速为5节，纠正了以往认为是2节<sup>[71]</sup>的不正确说法。

完成上述考察任务的有载人潜水器以及遥控潜水器，如“深探号”、“深海星”号、“南鱼座”号、“阿鲁明诺”号，“本·富兰克林”号、“斯珀符”(SPURV)号，“海蜂”号。在这些潜水器中装有测定水流相对速度和方向的萨沃纽斯转子，测定水温的热敏电阻传感器，测定水中盐度的电子盐度计，测定水静压的压力传感器。

经常用水声法测定水中声速和潜水器至海底的距离。通