

文章编号:1002-0640(2010)06-0001-06

自主水下航行器的研究现状与挑战^{*}

赵 涛,刘明雍,周良荣

(西北工业大学航海学院,西安 710072)

摘 要:自主水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)无论在民用还是军事方面都有广泛的应用,具有潜在的教育、科学和军事价值。简要的介绍了自主水下航行器的国内外的发展概况,讨论了自主水下航行未来发展所存在的技术问题,并探讨了自主水下航行器的未来发展趋势。最后,就我国应采取的对策与措施提出了建议。

关键词:自主水下航行器,导航,多源信息融合,导航通讯一体化

中图分类号:TP391

文献标识码:A

A Survey of Autonomous Underwater Vehicle Recent Advances and Future Challenges

ZHAO Tao, LIU Ming-yong, ZHOU Liang-rong

(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China)

Abstract: Autonomous Underwater Vehicle (AUV) has been widely developed for civil and military applications. The potential worthiness of AUV plays an important role in support of educational, scientific and military applications. In this paper, it first surveys the developments and applications on AUV over the world, and AUV development in china. Meanwhile, future technical challenges on AUV are articulated. Finally, the future directions of AUV are outlined. Finally, some suggestions on our way to deal with the situation are dicussed.

Key words: Autonomous Underwater Vehicle, navigation, multi-source information fusion, integration of navigation and communication

引 言

水下航行器作为一种高技术手段,在海底这块人类未来极具价值的发展空间中起着至关重要的作用,发展水下航行器的意义是显而易见的。人们获取海洋数据的方法目前是昂贵且有限的^[1]。

随着电子、计算机等新技术的飞速发展及海洋工程和军事方面的需要,AUV引起国内外产业界和军方的关注。AUV代表了未来水下航行器技术的发展方向,是当前世界各国研究工作的热点^[2,3]。

1 国内外的 AUV 研究现状

1.1 国外的 AUV 研究现状

自主式水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)无论在军事上还是在国民经济中都有着广泛的应用,国内外都对 AUV 给予了高度重视。世界各国在水下机器人领域(Underwater Robotics),特别是深海作业设备研究方面作了大量工作,取得了相当的成就^[2-4]。

1993 年伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)研制成功一种自治式深海探测器(ABE),它属于水下自治式装置(Autonomous Underwater Vehicle 或 AUV)的一种类型是由一艘水面工作船引导下潜到调查区的探测器^[5]。它可根据事先制定的周期性工作计划对调查区内一系列预先指定的地点走航,摄取视频图像或做其他项目测量,采用一种声学导航

收稿日期:2009-04-20

修回日期:2009-06-15

^{*} 基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0877);国家“863”资助项目(2007AA0676)

作者简介:赵 涛(1982-),男,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向:先进控制理论与应用研究。

系统引导它移动,围绕它探测的区域走航,用视频快照做多种测量。



图 1 伍兹霍尔海洋研究自治式深海探测器(ABE)



图 2 太阳能电池的 SAUVII 水下机器人

2005 年 1 月 21 日,美国海军公布了经过大规模修订后的升级版的“海军无人潜航器主计划”,重新设定了无人潜航器的使命任务以及海军希望它具有的能力,同时指明了工业部门的发展方向^[23,24]。新计划以“21 世纪海上力量”为指南,重新确定了 9 个方面的重点能力,包括:情报/监视/侦察能力(ISR),水雷对抗能力(MCM),反潜战能力(ASW),检测/识别能力(ID),海洋学能力,通信/导

航网络节点能力(CN3),有效载荷发送能力,信息战能力(IO)以及时敏打击能力(TCS)。



图 3 美国海军计划发展的“曼獭”无人潜航器



图 4 美国海军 AN/WLD-1 “遥控猎雷系统”(RMS)



图 5 自主式无人潜航器(BPAUV)



图 6 美国 REMUS 无人潜航器

表 1 美国海军正在发展的 4 类无人潜航器^[24]

类别	直径(m)	排水量(kg)	高负荷下续航能力(h)	低负荷下续航能力(h)	有效载荷体积(m ³)
便携式	0.076~0.23	<45	10	10~20	0.007
轻型	0.32	226	10~20	20~40	0.028 3~0.085
重型	0.53	<1 360	20~50	40~80	0.113~0.17
巨型	>0.91	~9 080	100~300	>>400	0.424~0.85

+外部存储空间

与此同时,美国高校热衷于对 AUV 的实践研究,其中代表有麻省理工学院(MIT)的 odyssey 系列,佛罗里达亚特兰大大学(FAU)的 ocean voyager II,美国海军研究生院(NPS)的 ARIES 等^[3,5]。



图 7 美国海军研究生院(NPS)的 ARIES



图 8 麻省理工学院(MIT)的 odyssey

在深海开发研究方面,日本在近 10 年里发展极为迅速,现在在某些方面已经逐渐超过美国成为这一领域的佼佼者^[4]。日本的海洋科学与技术中心(Marine Science and Technology Center, JAMSTEC)曾在 1987 年研制开发了世界上最先进的载人潜器 Shinkai6500,其设计深度为 6 500 m,已完成多次深海调查任务,是目前世界上下潜最深的载人潜器;此后又在 90 年代生产出深潜 ROV——

海沟号(KAIKO),设计潜深 11 000 m,配备有 4 个水平推进器和 3 个垂直推进器,并有避障声纳、高度及深度声纳。在 1995 年 3 月对马里亚那海沟(10 911 m)进行深海调查,获得成功。为了提高深海作业系统的作业能力和作业范围,弥补载人潜 Shinkai6500 在深海作业方面的不足,最大程度发挥载人潜器和无人潜器在深海作业方面的优势,最近,该中心又研制了一种半自主水下机器人 UROV7K,它是一个作业型水下机器人的试验床,主要用于与载人潜器 Shinkai6500 进行联合作业。UROV7K 的作业深度 700 m,载体的长 2.8 m,宽 1.8 m,高 2 m。动力采用锂离子电池,一次作业 2 h,由 1 mm 粗的光缆实现通信。UROV7K 由 4 个推进器实现水下运动,当作业完成后,将剩余的压载抛掉,并切断通信光缆,进行上浮回收。日本已经开发出了先进的 Pteroa(6 000 m)用于深海底调查。同时,该中心在 1998 年制定了新的 10 年发展计划,旨在“更深刻地理解地球和生命”,提出要在该计划内完成具有全深度(FULL DEPTH,10 000 m 以下)作业能力的深

海作业系统,为 21 世纪更全面地进行深海资源调查与开发做准备。



图 9 东京大学开发的“r2D4”海洋探测机器人



图 10 Shinkai6500

加拿大研制一艘大型的 Theseus 自治潜水器(1 000 m),用于在北冰洋冰层下的海水中放置光缆,它既可以用于“保持深度模式”运行,又可以用于“跟踪海底模式”运行。法国研制出的 Epaulard(6 000 m)主要用于海底摄影和测量海底地貌,勘查多金属结核区、深海底生态调查,以及对沉船、电缆、废料的搜索等。俄罗斯研制的 SeaLion(6 000 m)、Yantar(6 000 m)和 Drov(6 000 m)用于深水水文、地质、工程调查与探索。德国正在发展 DeepC 作业型 AUV,样机已经于 2003 年完成深水作业演示,该机器人工作深度 4 000 m,用来完成海洋地质勘探、资源开发、水下技术设备的安装、拆卸和维修等工作。挪威海军的 HUGIN 1000 新型水下无人航行器(AUV)首次测试成功,该 AUV 由挪威国防研究所和 Kongsberg Maritime AS 公司共同研发和制造。交付 HUGIN 1000 是挪威军方 HUGIN 水雷侦察系统计划(HUGIN MRS)的一部分。与此同时,该无人水下航行器还在积极向商业近岸油、气勘探市场进军。HUGIN 1000 是一型采用了大量新技术的小型无人水下航行器,这些新技术如:增扩的自主控制与导航功能、环境补偿聚合物锂电池技术、合成孔径声纳技术等。挪威海军的 HUGIN MRS 计划自 1998 年开始,目前正在使用评估阶段。挪威研制也研制了一种流体阻力较低的 AUV,它原来的任务是用于侦查,而现在则用于海洋研究工作。该 AUV 采用镁—海水电池作动力能源,通过水声链进行遥控,遥控距离达 110 n mile。该 AUV 若采用低压镁—海水电池,其潜在的航程可达 1 100 n mile~1 200 n mile,这种电池是目前比能最高的电池之一。上述国家研制开发不同类型、不同功能的无缆遥控潜水器都是当今 AUVs 的典型代表。

与此同时与深海作业系统相关的技术也得到了飞快的发展——低频水声通讯技术可使在水下的通讯距离达到 1000 km 以上,图像的水下传送距离可达 20 km 以上,目前我国也达到了 10 km。



图 11 加拿大的 Theseus 自治潜水器



图 12 法国研制开发的 Epaulard

自主水下机器人的远程精密导航技术当前国外做到航程的 0.18%(国内目前接近 0.2%),预计 5 年后可提高 10 倍。国外水下 GPS 水下定位精度可达 3 m。姿态控制精度达到 $\pm 0.1^\circ$,5 年后有可能提高一个数量级。高密度能源技术,当前用于自主水下机器人的二次电池可达 320 瓦时/公斤以上。比银锌电池高 4 倍,估计 5 年后可达 600 瓦时/公斤,我国也掌握 200 瓦时/公斤的二次电池技术。这都给深海资源作业开采系统的研制开发提供了强有力的技术支持^[4]。

1.2 国内的 AUV 研究现状

AUV 在国内的研究基本上围绕两个中心来进行,一是以中科院沈阳自动化所为核心,与中船重工集团 702 所、中科院声学所、哈尔滨工程大学等单位合作,先后研制出“探索者”号(1 000 m)水下航行器。在中国大洋矿产资源开发研究协会支持下,中科院沈阳自动化研究所与俄罗斯科学家合作研制开发 CR-01 型/CR-02 型(6 000 m)无人无缆水下机器人,能适应深海底平坦地形的多金属结核矿区工作环境,其探测内容只限于声学、光学和水文测量。CR-01 机器人于 1997 年在太平洋中国矿区完成了各项海底试验调查任务,并取得大量数据和资料。这表明中国已拥有这些高新技术的能力,并即将进入洋底多金属结核资源探测应用的实用阶段,也为我国 21 世纪进军深海大洋,开发海洋资源提供了强有力的技术手段。2006 年又研制出新型的海底矿藏勘测 AUV,这种新型 AUV 综合了 ROV 和 AUV 的优点,能够在远航程执行任务时进行准确的定位^[12-16]。二是以哈尔滨工程大学为中心,与 702 所、709 所、华中理工大学等单位合作,研制出“智水 I”、“智水 II”、“智水 III”和“智水 IV”等军用智能水下机器人,这标志着我国研制的智能水下航行器在智能控制技术已经接近了世界先进水平。

近两年来,由天津大学机械工程学院主持、中国海洋技术中心参加的国家科研项目——“温差能驱动的海洋监测平台关键技术研究”,近日通过专家鉴

定。该项目研制成功的海洋监测平台,是一种新型的水下机器人系统。它是利用系统浮力变化和可更换的翼板,实现垂直剖面运动和水下滑翔运动。其主要特点是利用海水表面与水体一定深度的温度差所产生的温差能量作为驱动能源。与电能驱动的水下监测平台相比,温差能驱动的水下监测平台具有噪音小、续航时间长、成本低等优点。专家对此项研究成果给予高度评价,认为该成果具有自主知识产权,关键技术指标达到国际先进水平,可应用于海洋动力环境监测、海洋赤潮监测、海洋资源探测,并可用于构建立体监测网络系统。



图 13 我国第一台潜深 6000 米
自治水下机器人—
CR-01



图 14 CR-2 型水下航行器



图 15 新型 AUV



图 16 水下航行器

“十五”期间,大洋协会组织有关部门承担国家“863”计划自动化领域的重点项目“7 000m 载人深潜器”,争取在近期研制出能够在深海大洋底进行多项作业的多种资源取样,声学 and 光学探测、海洋环境要素测量、海底底质土工力学特性测量的载人深潜器^[19,20]。

2 AUV 存在的技术挑战

因为没有连接电缆,AUV 可以从小而简捷的母船上发射,甚至从船坞或码头上发射,这也使它能够能够在距母船或平台相当远的区域作业。但同时也决定了 AUV 的操作受其导航、控制系统的测量和计算能力的制约。而且 AUV 只能依赖于其自身的动力源,减少了可能的任务持续时间^[3]。由于上述限制,以下几个关键技术将是未来 AUV 发展中必须解决的问题^[1-4]:

(1) 水下通讯问题——陆上、空中、空间航行器的位置测量和通信可以利用电磁波,但在电磁波衰减很快水下环境中,水下航行器的位置测量和通

信必须应用水声技术来完成^[17,18]。随着水声频率的增加,声波的能量更容易被海水吸收,因此,远距离通讯和测量必须使用低频水声信号。当频率非常低时,要求的转发器的尺寸大得无法实现,并且数据传输带宽很低。探测目标时,主动声纳可以精确测量距离,但方位的测量精度很差,而且水温、盐度和压力的变化会导致声波传播速度的变化,在几百米的距离内声波的传播都会由于折射而发生显著的弯曲,造成测量的误差。

(2) 导航问题——目前及未来的一段时间,在水下导航方面,可能应用的方式主要有惯性导航系统(INS)、航位推算、卫星或无线电(如 GPS、BD、GLONASS 等)、光学、声学、地形相关导航等。但单独使用 INS 并不能满足较长时间较远距离航行的需要;结合多普勒速度声纳(DVS)的导航会受到 DVS 探底深度及海洋环境的限制;卫星无线电导航在水下无法进行;光学导航适用范围有限且误差会累积;声学导航受到适用区域及海洋环境影响限制;地形相关导航技术远未成熟,适用范围及精度有限。

(3) 控制问题——设计水下航行器控制系统所面临的主要困难有:系统模型具有高度非线性、时变、强耦合等特点,流体动力学参数不确定,波浪和海流的随机扰动,航行过程中的重心和浮心变化等。因此要求控制系统具有较强的鲁棒性,以克服外界的干扰和动态模型的未建模不确定性,并具有自校正的能力,以适应运行过程中的动态特性和水下环境变化。另外,从工程应用的角度考虑,水下航行器的控制系统不能过于复杂,必须能够通过其自身携带的计算机在线实时实现。显然,控制算法的完备性和简单性是相互矛盾的,设计者必须折衷考虑^[3]。

(4) 能源问题——能源是 AUV 的关键技术之一,其续航力、航速和负载能力均受制于可用能源,而可用能源又取决于类型、容许的质量和空间等。目前多数 AUV 采用电动力,电能来自所携带的电池组。尽管能量密度较低(单位重量能量)和比能量(单位体积能量)较小,但考虑到成本、寿命、方便性、可维修性、安全性及构件供应的连续性等因素,电池尤其是一次电池和可充电电池(如锂电池)在今后至少 5 年内仍将占据主导地位。从长远看,燃料电池将很有前途,因此发展具有运行寿命长、工作电流大、比功率高、比能量和能量效率高、无污染的燃料电池是关键能源技术问题^[2,4]。

水下探测技术是开发利用海洋过程中需要面对的一个问题,它是通

过声学、光学和电磁学等手段,利用声纳、水下电视和磁探仪等设备对水下目标进行探测、观察与识别过程。AUV 作为一个水下目标探测的工作平台,安装声纳、水下电视和磁探仪等探测仪器,能够在海洋水下行经中进行全方位、连续的观测和作业,可以在水下长时间稳定地工作。水下探测技术的提高,对 AUV 在水下工作环境提供了一对“眼睛”,提高 AUV 的工作能力,是未来 AUV 发展的一个重要技术攻关课题^[22-24]。

3 AUV 未来发展趋势

目前自主式水下航行器正处在大力发展阶段,未来自主式水下航行器的发展趋势为以下几个方面^[11,12,25]:

(1) 向深海远航程发展——AUV 是以实施远距离海上或水下目标的探测或攻击为目的,因此远航程式 AUV 的生命所在,是领先于现有各类水下无人航行器及水中兵器的重要标志。同时,6 000 m 以上水深的海洋面积占海洋总面积的 97%,因此许多国家把发展 6 000 m 水深技术作为一个目标。

(2) 向导航通讯一体化发展——要实现 AUV 向深海远航程发展,水下导航与通信是制约水下自主航行器实现深海远程航行发展的两大重要关键技术。导航方式根据应用场合的不同而发展为多种导航方式,如无线电导航系统、惯性导航系统和卫星导航系统等。各个导航系统都有着不同或相同的优缺点,适用于不同的应用场合。单独使用上述任何一种导航方式在深海远程的航行应用中均存在无法避免的困难,综合利用多传感器信息的多源信息融合(Multi-source Information Fusion: MSIF)方法是导航技术发展的必然趋势。

(3) 隐蔽性——对于军用 AUV,必须保证能长时间水下潜航,具有良好的隐身性能。

(4) 小型化——由于小型化技术使得水下航行器具有体积小、阻力低、机动灵活、隐身性能好、突击能力强、成本低、可批量生产、搭载方便的特点,使得微小型水下航行器非常适合发展成为一种无人化、智能化的水下作业系统,由于微小型水下航行器体积小,尤其在海底地形非常复杂的情况下,微小型水下航行器的机动特性和智能程度是任务能否顺利完成的关键。

(5) 智能化——水下是一个复杂的工作环境,AUV 可自主智能控制,具有很高的自主能力、记忆能力和学习能力,自主适应外界环境的变化。操作人

员只需下达使命给机器人,与战术甚至与战略有关的任务,都由水下机器人自主完成,并能实现精确自主定位,将大大提高 AUV 的执行任务的效率。

(6) 灵活的机动性和多使命的重构性——可实现大范围机动航行,并能够完成水下悬停或微运动状态下的作业任务;可搭载不同任务模块,担负多种任务,具有使命重构能力。兼有两者性能的 AUV 将大大提高自身的效费比。

(7) 多 AUV 协同工作——多个航行器协同完成更复杂的战斗使命,提高战斗效率,还可以作为水下声通信自组网的支撑技术及网络的动态延拓。

4 结束语

我国 70 年代初开始自主水下航行器技术的研究,几十年来在水下工程探测技术方面已经取得了很多成就。但是在以军事作战为目的,具有自主远程航行、大续航力和精确定位,并能完成多种作战功能的自主水下航行器的技术才刚刚起步,因此,应大力发展自主水下航行器关键技术的研究,才能在较短的时间内减少与发达国家的差距,从而更好地促进经济的发展和国家的和平,特提出如下建议:

(1) 加大集通讯、水声定位和导航定位技术于一身的海洋 GPS 在 AUV 中的应用研究。用海洋 GPS 为 AUV 定位具有定位时间短,定位精度高,隐蔽性好等优点,可较好地解决 AUV 的三维实时精确定位问题。

(2) 利用我国的人力、智力优势,在 AUV 导航关键技术上有所突破。我国所作的导航系统与国外的发展水平还有一定的差距,到目前为止,没有比较成熟的产品,大部分先进导航设备都只限于国外引进。我国应自主开发,形成具有自主知识产权的先进导航系统,缩小与发达国家的水平。

(3) 加快统一 AUV 标准化和模块化的步伐。目前,国内外研究 AUV 的机构,大部分都呈现“闭门造车”的现象,各自生产的产品不能兼容,对资源是很大的浪费。为此,统一标准化的建立,使 AUV 之间可以使不同的器件、接口和任务模块等,进行兼容,提高了 AUV 的使用效率,节约了大量的资金。

参考文献:

- [1] 封锡盛,刘永宽. 自治水下机器人研究开发的现状和趋势[J]. 高技术通讯,1999(9):55-61.
- [2] 张 剑. 基于神经网络的水下机器人建模方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学硕士学位论文,2006.

- [3] 高 剑. 自主式水下航行器的建模与自适应滑模控制[D]. 西安:西北工业大学硕士学位论文, 2004.
- [4] 宋寿山. 基于多推进器的 AUV 建模与控制器设计[D]. 西安:西北工业大学硕士学位论文, 2006.
- [5] Bradley A, Yoerger D R. Design and Testing of the Autonomous Benthic Explorer[C]//Proceedings of the 20th Annual Symposium of the Association of Unmanned Vehicle Systems, Washington DC, 1993.
- [6] Marco D B, Martins A, Healey A J. Surge Motion Parameter Identification for the NPS Phoenix AUV [R]. In International Advanced Robotics Program (IARP'98), Lafayette, 1998.
- [7] 陈剑峰. 水下航行器组合导航系统容错方法研究[D]. 西安:西北工业大学硕士学位论文, 2007.
- [8] Blanke M, Lindegaard K P, Fossen T I. Dynamic Model for Thrust Generation of Marine Propellers [C]//In 5th IFAC Conference on Maneuvering and Control of Marine Craft. Aalborg, Denmark, 2000.
- [9] Yuh J. Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey [J]. Autonomous Robots, 2000(8): 7-24.
- [10] Griffiths G, Jamieson J, Mitchell S, et al. Energy Storage for Long Endurance AUVs [C]//Proceedings of Advances in Technology for Underwater Vehicles. March London, England, 2004.
- [11] 燕奎臣, 李一平, 袁学庆. 远程自治水下机器人研究[J]. 机器人, 2002, 24(4): 329-334.
- [12] 冯正平. 国外自治水下机器人发展现状综述[J]. 鱼雷技术, 2005, 13(1): 5-9.
- [13] 李一平, 封锡盛. “CR201”6000m 自治水下机器人在太平洋锰结核调查中的应用[J]. 高技术通讯, 2001(1): 84-87.
- [14] Liu T, Xu Q N, Wang H Z, et al. “CR-02”6000m AUV Hull Structure Systems[J]. Journal of Ship Mechanics, 2002, 6(6): 114-119.
- [15] 刘正元, 李一平. “CR-02”AUV 无动力下潜运动预报[J]. 机器人, 2002, 24(5): 386-390.
- [16] 李一平, 燕奎臣. “CR-02”自治水下机器人在定点调查中的应用[J]. 机器人, 2002, 24(5): 359-363.
- [17] 郑翠娥, 孙大军, 张殿伦, 等. 超短基线声学定位系统安装误差精确校准[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(8): 894-898.
- [18] 郑翠娥, 孙大军, 张殿伦, 等. 超短基线声学定位系统安装误差校准技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(8): 171-173.
- [19] 严卫华, 徐德民, 李 俊, 等. 自主水下航行器导航技术[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(6): 11-15.
- [20] Bechaz C, Thomas H. GIB System: The Underwater GPS Solution [C]//UDT (Undersea Defence Technology). Europe, 2000.
- [21] Bellingham J, Goudey C, Consi T, et al. A Small Long Range Autonomous Vehicle for Deep Ocean Exploration [C]//Proceedings of the 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, CA, 1992.
- [22] Griffiths G, Birch K. Oceanographic Surveys with a 50 Hour Endurance Autonomous Underwater Vehicle [C]//Proceeding of the Offshore Technology Conference, Houston, TX 2000.
- [23] Bodson M. Evaluation of Optimization Methods for Control Allocation [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2002(25): 703-711.
- [24] 章正宇, 周寿桓. 水下目标探测中的激光技术[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2001, 28(6): 797-802.
- [25] 刘广荣, 黄 睿, 金伟其, 等. 水下探测光电成像技术及其进展[J]. 光学技术, 2004, 30(6): 732-736.
- [26] 张宁川, 梁开龙. 利用雷达图像探测浅海地形技术综述[J]. 测绘通报, 2003(5): 13-17.
- [27] 潘 峰. 远程 AUV 组合导航滤波算法研究[D]. 西安:西北工业大学硕士学位论文, 2006.

下 期 要 目

- 鱼雷加速可靠性试验体系浅述
- 中程空空导弹冲淡式干扰模型
- 一种带有可信度因子的直觉模糊近似推理方法
- INS/GPS/CNS 组合导航系统仿真研究
- 基于时延估计的多基地水下目标被动定位及误差分析
- 空地一体化传感器网络中的节点定位算法
- 一种连续属性离散化的新方法
- 基于时间延时的调频步进频率 ISAR 欺骗干扰研究
- 组网电子对抗中辐射源信号跟踪方法研究
- 基于 Lyapunov 方法的轮式移动机器人全局轨迹跟踪控制
- 吊放声纳模拟器主动探测模型研究
- 基于矢量传感器的探测系统信息处理
- 基于体系结构的 C⁴ISR 系统可靠性指标体系研究
- 机动导弹武器系统生存能力评估分析
- 航空瞄准新算法 AFA 的剖析与改进研究
- 基于矩阵重构算法的宽带相干
- 多弹作战中的任务重分配方法研究
- 对空警戒雷达网抗干扰效能模型研究
- 雷对空警戒雷达网抗干扰效能模型研究