

# 用于天然气水合物调查的轻便型声学深拖系统总体方案分析

刘晓东<sup>1,2</sup>, 赵铁虎<sup>3</sup>, 曹金亮<sup>1</sup>, 王志博<sup>4</sup>, 侯德永<sup>4</sup>, 张东升<sup>1</sup>

(1 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2 声场声信息国家重点实验室, 北京 100190;  
3 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071; 4 中国船舶科学研究中心, 无锡 214082)

**摘要:**论证了用于天然气水合物调查的轻便型声学深拖系统的总体方案,其拖曳方式选择是其核心问题之一,重力型拖体操作方便但稳定性差,弱正浮力型拖体稳定性好而操作复杂。首先论证了两型声学深拖的运动性能,分析了提升重力型拖体稳定性的措施,结果表明,重力型拖体俯仰运动稳定性显著弱于弱正浮力型拖体,并且各项改善措施对于稳定性提高不显著。其次对测深侧扫声呐、多波束测深声呐、浅地层剖面仪和声多普勒测速仪等声学深拖系统主要搭载声呐开展分析,准定量的得到对拖曳平台稳定性的要求。综合考虑拖体稳定性、配套装备要求、开发经验和成本等因素,为了获得更好的探测结果,最终确定采用弱正浮力型拖曳系统,并给出了系统的总体设计方案。

**关键词:**声学深拖系统;重力型拖曳系统;弱正浮力型拖曳系统

**中图分类号:**TE53 **文献标识码:**A **DOI:**10.16028/j.1009-2722.2015.06002

声学深拖系统是一种在深海区进行海底特性调查的大型海洋装备,一般通过拖曳缆放到近海底进行高精度地形地貌、浅表层地质结构、流场和其他物理化学参数调查,母船可以通过拖曳缆给拖体供电,因此,声学深拖可以进行长时间连续工作,可广泛应用于深海调查、深海工程、遇险目标搜寻等领域<sup>[1,2]</sup>。

考虑天然气水合物资源调查及其未来应用的特点<sup>[3-9]</sup>,需要研制一套 3 000 m 级轻便型声学深拖系统,本文表述了 3 000 m 级轻便型声学深拖系统的总体方案及其确定理由。为了体现系统的轻便性,需要考虑拖曳方式、装备选择等一系列问题,其中核心问题是拖曳方式的选择。依据拖曳

方式不同,声学深拖系统分为重力型(图 1)和弱正浮力型(图 2)2 类<sup>[10]</sup>。重力型拖体本身质量较大,拖缆直接连接拖体,为提高稳定性可增加阻尼伞等辅助设施,其特点是操作方便,但稳定性略差。弱正浮力型的拖体一般具有 10~40 kg 正浮力,拖缆首先连接具有较大质量的压载器,再经过一定长度的中性浮缆连接拖体,其特点是拖体平台稳定性好,但操作比较复杂。因此如何确定最终拖曳方式需要进行仔细论证。

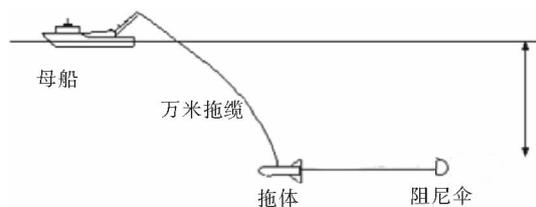


图 1 重力型拖曳系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the gravity type of towing system

收稿日期:2015-03-09

基金项目:中国地质调查局国家海洋地质调查专项(GZH201100308)

作者简介:刘晓东(1977—),男,研究员,主要从事海洋声学技术与声信号处理方面的工作. E-mail:liuxd@mail.ioa.ac.cn

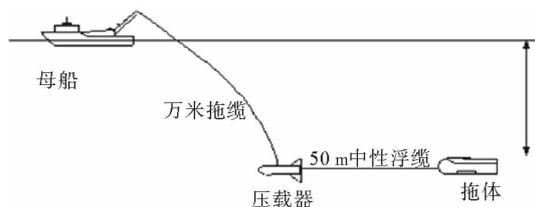


图 2 弱正浮力型拖曳系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of weak positive buoyancy type of towing system

基于上述问题,分 6 个部分展开讨论:①根据天然气水合物资源探测的需求,确定声学深拖的工作环境和主要功能。②根据国内外研究现状,确定拖体平台和主要声学探测装备的备选形式。③对拖体平台性能进行分析,核心工作是确定其运动性能,并评估改善拖体平台运动性能措施的可行性,为确定拖曳形式和声学探测装备的选型提供依据。具体而言,针对重力型拖体,首先分析论证其运动特性,同时分析论证采取姿态稳定措施后能否满足系统需求。针对弱正浮力型拖体,主要考虑已有系统小型化之后是否满足轻便性需求。④分析声学探测装备对拖体平台运动特性的要求,确定声学装备选型依据。⑤根据上述分析论证结果确定最终选型方案,选配定位系统、通信电源同步系统等外围配套设备。确定拖体系统总体方案及能够达到的技术指标体系。⑥对全文进行了总结。

## 1 总体需求

考虑天然气水合物调查特点,声学深拖系统应当具备海底地形探测、海底反向散射强度探测、浅表层剖面探测等主要功能,作为上述声呐正常作业的要求,系统需要具有载体位置、载体姿态、载体速度、载体深度、海水温度和海水盐度的探测能力。同时考虑有关资源调查的特点,需要系统具备  $\text{CH}_4$  浓度和  $\text{CO}_2$  浓度的探测能力。

## 2 国内外研究现状

声学深拖系统分为重力型和弱正浮力型两类。目前国内尚无研制成功并投入使用的深海用

重力型声学深拖系统,已有并投入使用的是中科院声学所研制的 DTA-6000 声学深拖系统(图 3a)。该系统是我国具有自主知识产权的第 1 套声学深拖系统,其重量约 1 000 kg,最大工作深度 6 000 m,拖曳速度为 2~4 kn,主要安装有高分辨率测深侧扫声呐、浅地层剖面仪、多普勒计程仪,以及声信标、运动传感器、温盐传感器、压力传感器等设备。目前中科院声学所研制的新型弱正浮力型深拖系统见图 3b。



(a) DTA-6000 声学深拖



(b) 新型弱正浮力拖体

图 3 国内弱正浮力型拖体

Fig. 3 Domestic produced weak positive buoyancy towing system

国外重力型拖体最具代表性的产品是美国 Benthos 公司的流线型拖体 C3D 系统,该系统最大作业深度 2 000 m,标配侧扫声呐、多波束测深声呐、深度计、CTD 和运动传感器,还可以选配浅剖等设备。此外还有框架式重力拖体 NEPTUNE 和 Focus-2。NEPTUNE 最大工作深度 6 000 m,水中重量为 850 kg,拖曳速度 1~2 kn;Focus-2 拖曳速度为 4~8 kn。弱正浮力型拖体主要包括美国 Benthos 公司的 SIS-3000XL 和 Edgetech 公司的 2400 DSS、挪威 Kongsberg 公司的 AMS-710HP 以及英国 GeoAcoustics 公

司的DT-2000等。典型拖体如图4、5所示。SIS-3000XL系统最大工作深度6000m,空气中重量818kg,拖曳速度1~5kn,拖体上主要安装有侧扫声呐、浅剖、多波束声呐及多普勒计程仪、运动

传感器、温盐传感器、压力传感器等设备;2400DSS系统最大工作深度6000m,空气中重量910kg,拖体上可以安装深水多波束、侧扫声呐、浅地层剖面仪、磁力仪、声信标和SVP等设备。

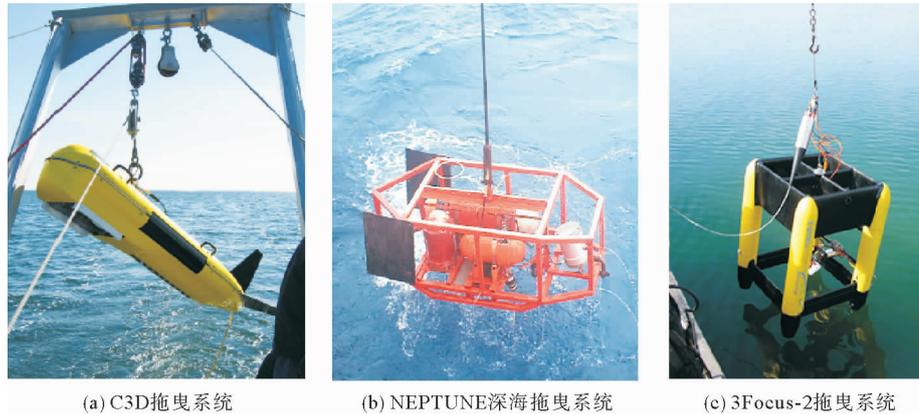


图4 国外重力型拖体

Fig. 4 Imported gravity type of towing system

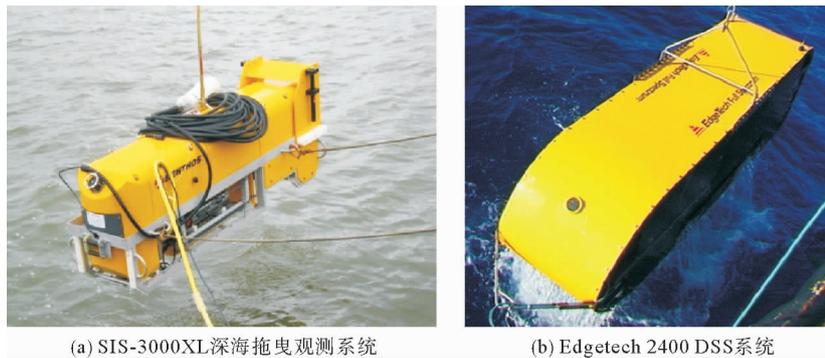


图5 国外弱正浮力型拖体

Fig. 5 Imported weak positive buoyancy towing system

根据调研结果,受拖缆影响,深拖系统的拖曳速度不能太快,并且也不适用过高级别的海况。因此,确定3000m级轻便型声学深拖系统工作海况不大于4级,5级海况下可以回收,拖曳速度2~4kn。同时由于海底微地貌是声学深拖系统最重要的探测内容,它对载体的运行姿态和航速等要求非常高,为此载体形式的选择尤为重要。表1给出了两型拖曳平台的关键技术对比。下节将在充分调研的基础上,结合项目需求,分析论证两型拖体的优缺点以及可行的改进措施,最终选

出最合适的拖体平台。

### 3 拖曳平台运动性能论证

影响拖曳平台性能的最主要因素是波浪,母船受波浪作用发生大幅度的振荡和不同程度失速,母船的运动通过拖缆传递到拖体;水中的拖缆受波浪的直接影响发生扰动运动,也会沿缆传递至拖体,影响拖体的运动稳定性。重点考虑4级海况,有效波高2.5m以下的情况。

表 1 两型声学深拖系统特点对比

Table 1 Comparison between two types of acoustic deep-towing system

	弱正浮力型声学深拖系统	重力型声学深拖系统
主要优点	<ul style="list-style-type: none"> <li>①拖体姿态相对稳定,主要运动被压载器所吸收,拖体自身横滚和升沉特性良好,纵倾和首摇也可接受;</li> <li>②拖体自身安全性较好,采用正浮力设计,遇到紧急状态可以自行浮出水面。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①设备操作和维护比较简单,相应的辅助支撑设备较少,可在更高海况下进行工作;</li> <li>②不需要安装浮力材,结构相对简单。</li> </ul>
主要不足	<ul style="list-style-type: none"> <li>①系统复杂程度相对较高,集成难度较大,维护保养工作量大;</li> <li>②为了实现弱正浮力,浮力材与设备重量接近 1:1,结构加工相对复杂;</li> <li>③辅助支撑设备种类繁多,系统布放回收程序复杂,增大了系统作业风险,且对作业海况、船舶及其配套设施有一定的限制,最终限制了系统的作业范围。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①拖体垂直方向运动较大,从而影响拖体姿态,进而对声纳性能有一定影响;</li> <li>②出现电缆断裂情况会造成拖体丢失。</li> </ul>

### 3.1 重力型论证

图 6、7 稳态计算给出了缆形、放缆长度、缆的张力分布等量化设计指标,对于 3 000 m 工作水深,如果满足 2~4 kn 的使用要求,最少需要 8 000 m 的缆,但如果考虑在深海以不超过 3 kn 速度进行拖曳,使用 6 000 m 缆即可。

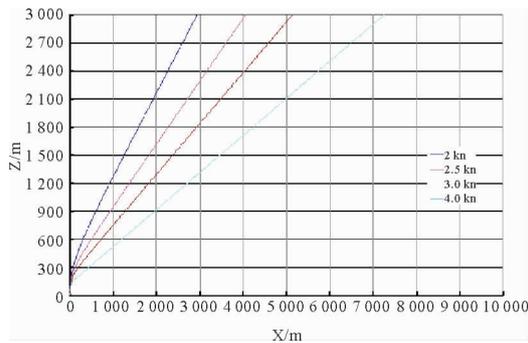


图 6 稳态直航拖曳时的缆形变化  
Fig. 6 Cable shape changes in straight towing in steady-state

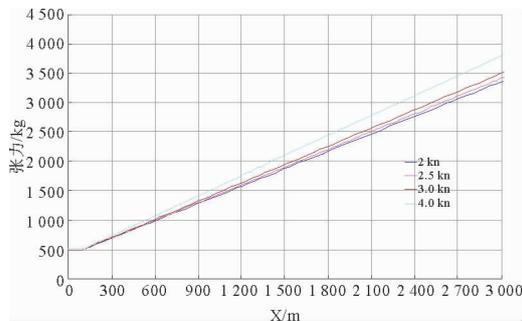


图 7 稳态直航拖曳情况下的张力沿缆的变化  
Fig. 7 The tension of cable in straight towing in steady-state

通过确定参数建模计算可知,干端扰动的传递十分显著,拖体的运动与干端运动的跟随性明显,不仅升沉周期一致,升沉的幅度也一致,并且张力变化随拖曳速度的提高而降低。保守估计,对于 4 级海况,考虑 50 kg(RMS)的垂向张力变化,最终会造成拖体纵倾产生约 7.8°(RMS)的变化,考虑仿真周期为 8 s,可以得到拖体纵倾的变化速度约为 6°/s。如果海况降为 3 级,纵倾变化的有效值约为 4°,变化率约为 3°/s。此值反映拖体稳定性并不好。

为了改善重力型拖体的稳定性,本文考虑了加装导流片、加装阻尼伞以及采取电缆保护装置等措施。通过仿真计算得到以下结论:①导流套必须成组连接具有一定的长度才能达到控制缆形的效果,其安装原理如图 8 所示,导流片之间采用连接片衔接,为防止导流片与缆之间产生相对滑动,间隔一定距离,使用扼制环将导流片与拖缆固定。导流套的安装位置对沉深、缆形略有影响(表 2),对于本设计中低速拖曳过程而言,航行定深控制效果不显著,对拖缆张力的改善无显著的影响。②阻尼伞安装如图 9 所示,然而当拖体沿运动轨迹进行升沉运动时,阻尼伞也跟随拖体做周期一致的升沉运动。阻尼伞增大拖缆水下端的张力,降低拖体的沉深,对拖体的升沉运动无改

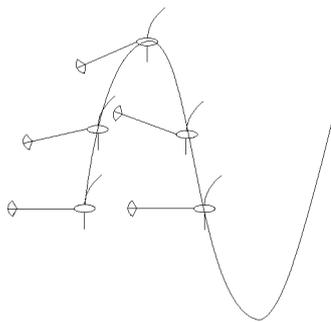


图 8 导流套组合总成  
Fig. 8 Combination of fairing sets

善。③电缆保护装置是一种被动升沉补偿装置。采用电缆保护装置可以避免产生过大的瞬间张力冲击造成电缆断裂,能够起到降低张力变化的作用,但不会显著降低张力变化的均方根值,从而也不会显著降低拖体的俯仰运动幅度<sup>[11,12]</sup>。

**表 2 放缆长度为 1 000 m 时,导流套沉深影响计算**  
Table 2 Calculation of fairing-caused depth with 1 000 m cable

水下端安装位置/m	组数/组	沉深/m	张力/kg
	0	589	
200	1	592	
	2	596	
	3	599	
100	1	574	502
	2	578	
	3	582	
10	1	557	
	2	563	
	3	568	



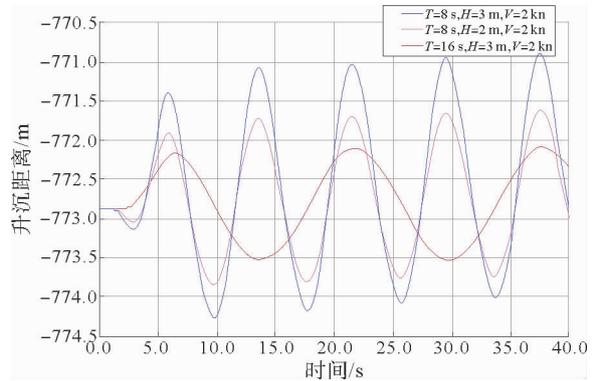
**图 9 阻尼伞的跟随运动**

Fig. 9 Following movement of damping umbrella

总之,虽然上述措施能够改善拖体的稳定性,但程度不明显。

### 3.2 弱正浮力型论证

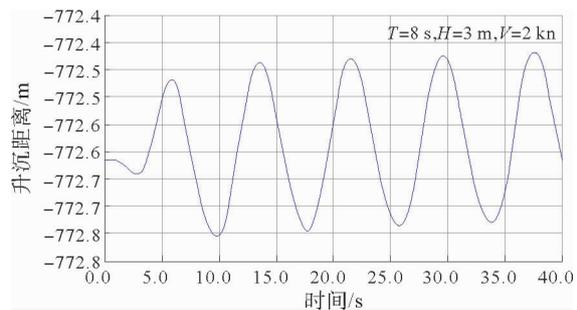
图 10 显示了不同的波浪周期和幅度对应的水下缆端的运动情况,根据建立的数值估算模型,沿缆的横向运动的传递在较短距离内可以得到衰减,沿缆的纵向传递的运动不能得到显著的衰减。弱正浮力型拖体通过脐带缆将运动传递到拖体处,在脐带缆长约 100 m 时,运动幅度可减小到沉降器端的 50%;在 200 m 处可减小到 20%;在 300 m 处可减小到 10%。随着压载器与拖体之



**图 10 沉降器升沉运动传递**

Fig. 10 Heave motion transfer of the depressor

间脐带缆长度的增加,波浪和船舶的影响显著降低,图 11 给出脐带缆长 200 m 情况下升沉运动幅度,可见升沉运动显著降低。此时拖体的纵摇周期将接近拖体本身的固有周期。



**图 11 中性拖体端运动**

Fig. 11 Movements of the neutral towing body

根据上述分析,合理设定拖缆长度,弱正浮力受到波浪及船舶运动的影响将显著降低,其纵摇运动将由拖体的固有周期决定,我国研制的弱正浮力声学深拖系统在 2.5 kn 稳定拖曳时拖体俯仰角实测数据方差约为 0.40°,均值为 0.19°,其纵摇周期约为 6 s,俯仰角变化率均方根值约为 0.42°/s,此结果反映了弱正浮力拖体运动的较理想状态,即使考虑一些其他影响,载体俯仰角变化率的均方根值达到 1°/s 以下也比较容易实现<sup>[12]</sup>。

### 3.3 两类拖体运动性能比较

表 3 给出了重力性拖曳系统与弱正浮力拖曳系统运动传递的对比分析。可见,重力型拖体受母船运动影响很大,各项提高稳定性的措施效果

不明显,拖体稳定性能较差。弱正浮力型拖体由于脐带缆的存在,受母船运动影响大幅衰减,纵摇周期由拖体固有周期决定,拖体稳定性比较理想。

表 3 运动传递比较

Table 3 Comparison of motion transfer between two types of acoustic deep-tow system

运动传递比较项目	重力式拖体	弱正浮力拖体
运动跟随性	重力式拖体与母船跟随运动幅值、周期与母船一致	拖体脐带缆将纵向传递转化为横向传递时衰减显著,周期与母船一致,但幅度大幅衰减
张力一致性	水下端张力与拖体重力、水流阻力量级一致	承重缆张力特性与重力式一致,脐带缆张力水平低,运动衰减效果显著
拖体纵摇运动	纵摇幅度受升沉作用力矩显著,纵摇幅度大,纵摇周期和母船一致。	中性拖体受纵摇扰动力显著减小,纵摇周期由拖体的固有周期决定

## 4 声学探测装备对平台稳定性需求

### 4.1 测深侧扫声呐和侧扫声呐

与侧扫声呐类似,测深侧扫声呐安装于拖体两侧,可同时获得高分辨率地形和地貌,根据其工作原理<sup>[13]</sup>,声呐主要估计回波在垂直平面内的到达方向,因此平台的横摇最多只是影响系统的作用距离。另外由于拖体在翼板的控制下,首摇运动比较慢,对声呐性能的影响也不大,而俯仰运动由于一般相对运动幅度较大,周期相对较短,将是测深系统性能的重要影响因素。随着发射时刻平台俯仰角和接收时刻平台俯仰角之间差值的变大,合成水平波束指向性的主瓣强度降低,旁瓣强度提高,当差值变大到一定程度时,出现波束分裂的情况,如图 12 所示,此时声呐将无法正常工作。

表 4 给出了测深侧扫声呐对平台稳定性的具体要求,如果要满足典型测深斜距 260 m,典型侧扫斜距 410 m,实际需要平台俯仰角均方根值在 1°左右,此时约 95%的时间内能满足探测要求。

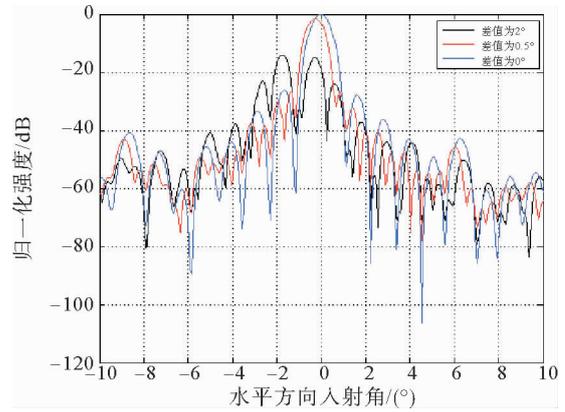


图 12 合成波束指向性

Fig. 12 Synthetic beam directionality

表 4 测深侧扫声呐对平台稳定性要求

Table 4 Requirements of platform stability for bathymetric sidescan sonar

探测功能	对合成波束旁瓣要求	作用斜距/m	发射和接收俯仰角差值要求	对俯仰角变化率要求
测深	< -20 dB	260	< 0.6°	< 1.7 °/s
侧扫	< -13 dB	410	< 0.9°	< 1.65 °/s

### 4.2 其他声呐设备

多波束测深声呐接收波束在沿着船行方向是宽波束,所以该声呐对载体稳定性要求不高,对于沿着船行方向波束宽度 20°的系统,理论上只要发射时刻平台俯仰角和接收时刻平台俯仰角之差 < 10°即可。对于多波束测深声呐获得的背向散射数据,由于与位置相关,也基本不受姿态变化的影响。

深海浅地层剖面仪是基于对声波穿透地层剖面后的回波信号强弱变化的测量来观察浅地层地质结构的声呐设备。对于用于深海的浅地层剖面仪一般波束较宽,通常不大于 40°,因此,对于通常的载体平台几乎不受平台稳定性的影响。

声多普勒计程仪测速时同样要求发射时刻平台姿态与发射时刻平台姿态之间的差值最好不要超过波束开角(一般为 4°)的一半,工作时声多普勒测速仪的工作斜距一般不超过 150 m,则根据  $V_{\theta} \leq 2 \frac{c}{2R}$  得到平台姿态角变化率  $V_{\theta} < 10 \text{ °/s}$  即可。

### 4.3 小结

根据上述论述可知,多波束测深声呐、浅地层剖面仪以及声多普勒测速仪对于拖体稳定性要求较低,可以安装于重力型或弱正浮力型拖体上。测深侧扫声呐和侧扫声呐对拖体平台稳定性要求较高,最好安装于弱正浮力型拖体上,如果安装于重力型拖体上,则工作海况需要限制在3级以下,应用范围将受到限制。

## 5 拖体系统总体方案

### 5.1 选型结论

综合前面论证结果,如果分别设计重力型和弱正浮力型声学深拖系统,所能达到的总体指标见表5。可以看出,重力型拖体系统相对简单,对配套装备要求较低,海上作业比较容易,具有一定的灵活性,但此类拖体稳定性较差,通过分析有关提高稳定性的措施,所产生的效果不明显,并且由于首次开发,所需要的投资较大。弱正浮力型拖体系统相对比较复杂,对配套装备要求也较高,但

表5 两型声学深拖系统指标对照

Table 5 Comparison of performance between two types of acoustic deep-tow system

	3 000 m级 重力型	3 000 m级 弱正浮力型
最大工作水深	3 000 m	3 000 m
工作海况	工作海况不大于3级,在5级海况能够进行拖体回收	工作海况不大于4级,在5级偏低海况能够进行拖体回收
拖体重量	<600 kg	约800 kg
拖曳速度	2~4 kn	2~4 kn
拖曳稳定性	拖体横摇和纵倾的标准差<4°	主拖体横摇和纵倾的标准差<1°
测深探测	多波束测深系统	测深侧扫声呐
侧扫探测	侧扫声呐	测深侧扫声呐
浅地层剖面探测	浅地层剖面仪	浅地层剖面仪
投资成本	高	低

此类拖体稳定性较好,并且由于已经具备多年研制经验,相对投资较小。为了获得较好的探测结果,还是建议使用弱正浮力型拖曳系统,尽可能降低系统重量,提高灵活性。

### 5.2 系统硬件总体结构

声学深拖系统硬件组成框图如图13所示。

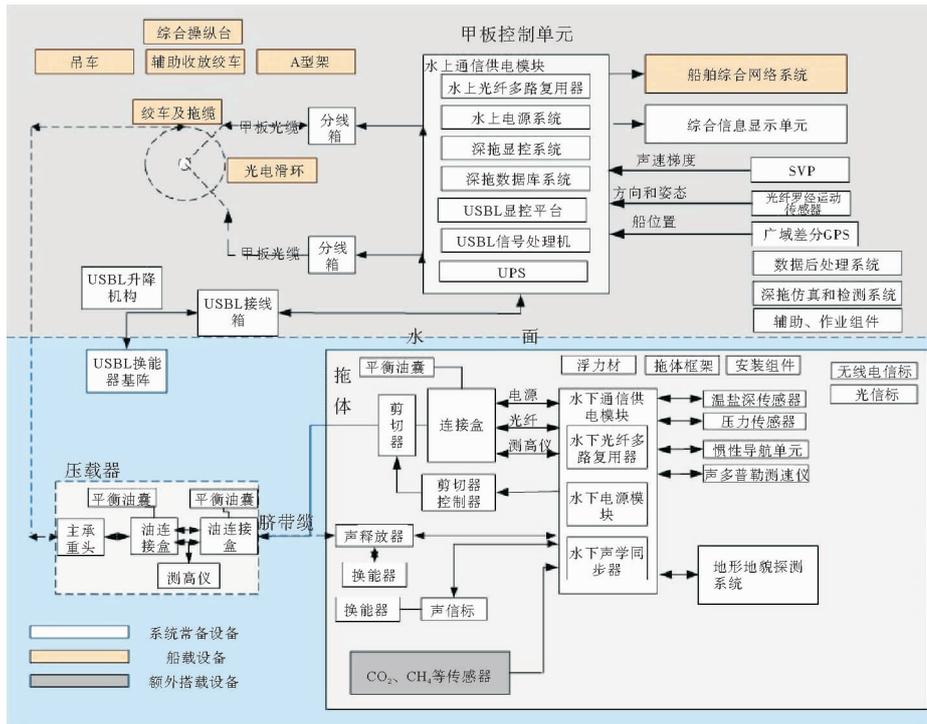


图13 声学深拖系统硬件组成框图

Fig. 13 Hardware block diagram of acoustic deep-tow system

根据各设备的功能将整个系统分成 9 个分系统,包括地形地貌探测系统、拖体平台系统、定位系统、通信电源同步系统、紧急安全系统、搭载传感器系统、甲板控制单元、系统连接组件和辅助作业组件。①地形地貌探测系统主要用于水深、侧扫和浅地层剖面探测;②拖体平台系统主要包括拖体和压载器;③定位系统用于水下拖体的定位,主要包括远程超短基线、星际差分 GPS 系统、声信标、惯性导航单元、声多普勒测速仪和压力传感器等部件;④通信电源同步系统主要包括电源部分、通信部分和声学同步器,其主要功能是为水下设备供电、提供水上水下设备进行通信的通道,并为水下声学设备提供声学同步器和传感器的时标标注功能;⑤紧急安全和传感器系统主要保障紧急状况下的拖体回收;⑥搭载传感器系统主要包括 CTD、CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 传感器等;⑦甲板控制单元主要由机柜、深拖显控系统、深拖数据库系统、声学辅助单元和 UPS 组成,在甲板控制单元的机柜中还安装了通信电源同步系统的水上单元;⑧系统连接组件包括各分系统之间的连接电缆和接线盒等部件;⑨辅助作业组件主要由回收杆、释放钩、绳子、钢缆、吊钩、充油工具、光纤工具包、吊带和小车等部件组成。

此外系统工作时还需要使用船上的绞车、万米光电复合缆、光电滑环、吊车、辅助收放绞车、船载光纤罗经运动传感器、A 型架和船舶综合网络系统等设备和系统。

## 6 结论

针对天然气水合物调查需求,介绍了国内外 2 种常见拖体类型及其优缺点。考虑轻便型要求,为了确定最终拖曳形式,针对典型海况下重力式拖体的性能进行了详细论证,得到了水下拖体俯仰运动的变化规律,同时还分析了加装阻尼伞、导流套和电缆保护装置等措施对拖体稳定性的影响。结果显示,重力型拖体俯仰运动稳定性显著弱于弱正浮力型拖体,并且各项改善措施对于稳定性提高不显著。

还论证了各主要声呐探测装备对拖曳平台的稳定性要求。基于声呐原理,对测深侧扫声呐、侧

扫声呐、多波束测深声呐、浅地层剖面仪和声多普勒测速仪等声呐开展分析,准定量的得到对拖曳平台稳定性的要求。确定测深侧扫声呐和侧扫声呐对拖体平台稳定性要求较高,一般只能安装在弱正浮力性拖曳系统上,而其他几类声呐一般都可以安装在两类拖体上。

根据上述结论,遵循优先保证性能,同时兼顾使用方便性的选择原则,确定采用弱正浮力型声学深拖系统,并提出了弱正浮力型拖体系统的总体设计方案。

### 参考文献:

- [1] 刘晓东,张方生,朱维庆,等.深水声学拖曳系统[J].海洋测绘,2005,25(6):37-40.
- [2] 汤民强,毕永良.深海路由勘察中深拖与 AUV 的技术对比[J].海洋测绘,2008,28(6):79-82.
- [3] Hovland M, Judd A G. Seabed pockmarks and seepages: impact on the geology, biology and the marine environment [M]. London: Graham and Trotman, 1988.
- [4] Sager W W, Lee C S, MacDonald I R, et al. High-frequency near-bottom acoustic reflection signature of hydrocarbon seeps on the Northern Gulf of Mexico continental slope[J]. Geo-Marine Letters, 1999, 18(4): 267-276.
- [5] MacDonald I R, Leifer I, Sassen R, et al. Transfer of hydrocarbons from natural seeps to the water column and atmosphere[J]. Geofluids, 2002, 2(2): 95-107.
- [6] De Beukelaer S M, MacDonald I R, Guinasso N L, et al. Distinct side-scan sonar, RADARSAT SAR, and acoustic profiler signatures of gas and oil seeps on the Gulf of Mexico slope[J]. Geo-Marine Letters, 2003, 23(3/4): 177-186.
- [7] Judd A G. The global importance and context of methane escape from the seabed[J]. Geo-Marine Letters, 2003, 23(3/4): 147-154.
- [8] Ballet N, Logan G A, Kennard J M, et al. Characterization and correlation of active hymn seepage using geophysical data sets: an example from the tropical carbonate Yampi shelf, Northwest Australia[J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(3/4): 145-164.
- [9] 栾锡武,赵克斌,Obzhurov A. 鄂霍次克海浅表层天然气水合物的勘查识别和基本特征[J].中国科学(D辑),2008,38(1):99-107.
- [10] 刘晓东,等.声学深拖系统研发集成项目方案论证报告[R].北京:中国科学院声学研究所,2012.
- [11] 王志博,等.重力式拖曳方案初步设计报告[R].无锡:中船重工第 702 研究所,2013.
- [12] 王志博,等.拖曳平台水动力计算报告[R].无锡:中船重工第 702 研究所,2013.

[13] 刘晓东. 高分辨率测深侧扫声呐系统——理论、系统和试验[D]. 北京: 中科院声学研究所, 2007.

验[D]. 北京: 中科院声学研究所, 2007.

## GENERAL SCHEME ANALYSIS OF THE LIGHTWEIGHT ACOUSTIC DEEP-TOW SYSTEM FOR GAS HYDRATE EXPLORATION

LIU Xiaodong<sup>1,2</sup>, ZHAO Tiehu<sup>3</sup>, CAO Jinliang<sup>1</sup>, WANG Zhibo<sup>4</sup>,  
HOU Deyong<sup>4</sup>, ZHANG Dongsheng<sup>1</sup>

(1 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2 State Key Laboratory of Acoustics, Beijing 100190, China; 3 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China; 4 China Ship-Science Research Center, Wuxi 214082, China)

**Abstract:** This paper presents the general scheme of a lightweight acoustic deep-tow system for gas hydrate exploration. The selection of the towing mode is one of the key problems. The gravity type of towing system is easily being operated with poor stability, and the weak positive buoyancy type of towing system is of good stability, but complex in operation. This paper demonstrates the performance of the two types of acoustic deep-tow system, and analyzes the ways to enhance the stability of the gravity type of deep-tow system. The results show that the pitch stability of the gravity type of towing system is much behind the weak positive buoyancy type of towing system, and the measures being taken to improve the stability is not effective. Secondly, in this paper we discussed the other methods, such as bathymetric sidescan sonar, sidescan sonar, multi-beam bathymetric sonar, subbottom profiler, acoustic doppler velocity log and other sonars, which are usually equipped in deep-tow systems, and have obtained the quasi-quantitative requirements for the stability of the towing platform. By consideration of platform stability, requirements for supporting equipment, development experience and cost factors, we recommended the weak positive buoyancy type of towing system for better detection results, and the overall design of the system is presented.

**Key words:** acoustic deep-towed system; gravity type towed system; weak positive buoyancy type towed system