

张世阳. 空气枪震源控制系统的发展和预测[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(9): 76-82.

空气枪震源控制系统的发展和预测

张世阳

(中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要: 海洋地震勘探是海洋地质调查的重要手段之一。空气枪控制系统是震源系统的重要组成部分。介绍了空气枪震源控制系统的组成及原理、空气枪震源控制系统的发展及实际应用情况。结合国内外物探船的实际工作情况和地震数据发展要求, 推测了气枪控制系统的主要发展方向和特点。

关键词: 空气枪震源; 海洋地质调查; 海洋地震勘探; 空气枪控制系统

中图分类号: P631.4⁶; P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2019.09012

0 引言

随着海洋强国战略的不断推进, 国家对海洋的重视程度越来越高^[1], 为满足海洋地质调查勘探程度日益加深的需要, 自 2010 年以来, 中国科学院海洋研究所“科学”号、国家海洋局海洋一所“向阳红 01”号、青岛海洋地质研究所“海洋地质九号”、中国海洋大学“东方红 3”号等海洋调查船都装备了庞大且复杂的海洋地震勘探系统^[2]。海洋地震勘探主要采用空气枪震源, 其中空气枪控制系统是震源系统的重要组成部分。本文主要介绍了空气枪控制系统的发展及其在海洋立体震源和多源激发采集中的应用, 并推测空气枪控制系统的主要发展方向和特点。

1 空气枪震源介绍

基于自由气泡震荡理论, 1964 年美国 Bolt 科技公司的 Stephen Chelminski 发明了空气枪^[3]。

经过近 60 年的理论研究和商业竞争, 空气枪以其结构简单、能量强、频谱宽和重复性好^[4]等优点, 已成为海洋地震勘探中应用最为广泛的人工震源。目前海上地震勘探中主要有 Teledyne Bolt 公司的 Bolt 枪、Seamap 公司的 Sleeve 枪(收购自 ION 公司)和 Sercel 公司的 G 枪等 3 种主流空气枪震源。这 3 种空气枪结构和工作原理基本相同。空气枪主要部件都由电磁阀、时断传感器和不锈钢枪体等组成。其中不锈钢枪体又由主气室、启爆气室和运动部件等组成。根据枪体运动部件的形式不同, 人们将运动部件为内部梭阀的 Bolt 枪和 G 枪称之为梭阀枪, 运动部件为外部滑套的 Sleeve 枪称之为套筒枪。空气枪工作原理主要由充气、启爆、释放、和返回 4 个过程完成一个激发循环。空气枪能量大小与其体积和工作压力正相关。峰峰值越大, 震源容量越大, 初泡比^[5]越大, 气泡脉冲越小, 气枪震源子波性能就越好。

2 空气枪震源控制系统的需求

在几何空间上单枪是十分理想的点震源^[6], 所以空气枪震源的早期应用多为单枪配置。为提高震源输出能量, 人们不断追求大容量高压枪。但单只气枪激发时释放的气泡在水中反复震荡, 产生强烈的气泡脉冲, 即气泡效应。气泡脉冲是一

收稿日期: 2019-05-26

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20191003)

作者简介: 张世阳(1987—)男, 工程师, 主要从事海洋多道地震调查方面的工作。E-mail: shi1987yang@163.com

种干扰波,造成记录上的地震子波区分困难,降低地震勘探分辨率^[7]。另外,受机械制造限制和HSE现场作业要求,一味通过提高空气枪容量和工作压力来提高震源能量的方法越来越难以实施。

20世纪60年代末至70年代初,Ziolkowski等^[8]提出了气枪阵列技术相关理论。一种方法是将几只不同容量的空气枪进行组合,并控制各个气枪在相同时刻同步激发,地震子波在叠加后主脉冲得到加强,气泡脉冲由于周期不同而相互减弱或抵消,此种方法即调谐枪阵。另一种方法是2只或2只以上相同容量的空气枪在枪距较小时,同步激发所产生的气泡脉冲会相互抑制,且震源输出能量比相同容量的单只空气枪更高,此种方法即相干枪阵。但不管是调谐枪阵还是相干枪阵,都要求精确控制多只空气枪的同步激发,以达到增强震源能量并抑制气泡效应的目的。空气枪震源同步控制系统应需而生(图1、2)。

3 空气枪控制系统组成及原理

如图3所示,典型的空气枪控制系统主要由系统主机、同步控制单元、气枪控制和信号采集单元

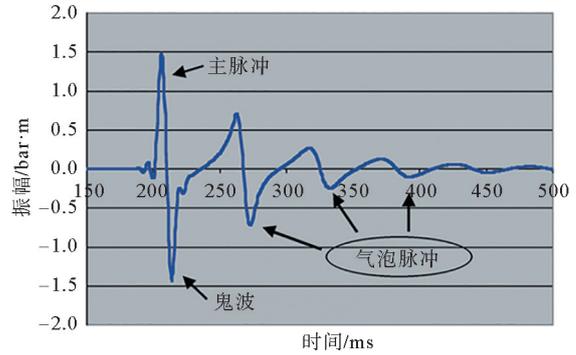


图 1 单枪子波形态(60 in³ Sercel G 枪)

Fig.1 Wavelet form of single air gun (Sercel G. Gun 60 in³)

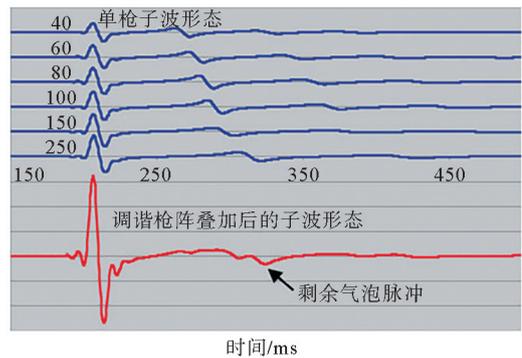


图 2 调谐枪阵子波形态(多只不同容量 Sercel G 枪)

Fig.2 Wavelet form of tuned gun array (Sercel G Guns with different volume)

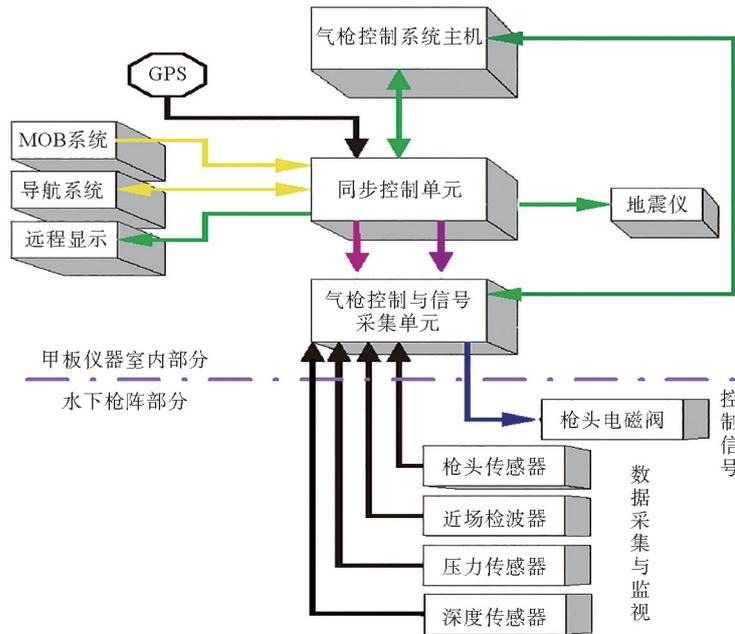


图 3 典型气枪控制系统组成图

Fig.3 Composition of a typical air gun control system

* 1 in=2.54 cm; 1 in³=16.387 cm³

元和各种水下传感器等组成。空气枪控制系统主机运行气枪控制与显示软件,负责气枪控制指令的生成和水下传感器数据的采集与处理,实时监控气枪工作状态。同步控制单元产生整个系统的时间基准信号,并提供与导航系统、地震仪等其他设备的同步接口。气枪控制和信号采集单元按照系统主机控制指令产生气枪激发信号,并通过各种水下传感器实时采集空气枪的枪头传感器、近场检波器、深度传感器和压力传感器等数据,回传给系统主机进行分析计算和监控显示。

实际应用中,通常采用调谐枪阵和相干枪阵相配合的组合气枪震源。组合气枪震源由几只至上百只空气枪组成,为实现主脉冲的增强和压制气泡脉冲的目的,每只空气枪要尽可能在相同时刻同步激发。但由于受机械制造误差、信号传输干扰延迟等因素的影响,每只气枪的实际激发时刻会有差异。如图4所示,即与同一瞄准时刻对比,某些气枪提前激发,某些气枪延后激发,主脉冲叠加后能量有损失(振幅变小),同时脉冲宽度不够尖锐,造成子波信号不易识别。气枪控制系统原理即为实时采集每只空气枪的枪头传感器激发时刻信号,与瞄准时刻进行对比,对时间差异进行合理补偿,计算出每只气枪的实际激发瞄准时间(图5),实现协调多个组合气枪同步激发。

常规地震勘探要求气枪同步误差在 $\pm 1 \text{ ms}^{[9]}$ 以内,高分辨率地震勘探要求气枪同步

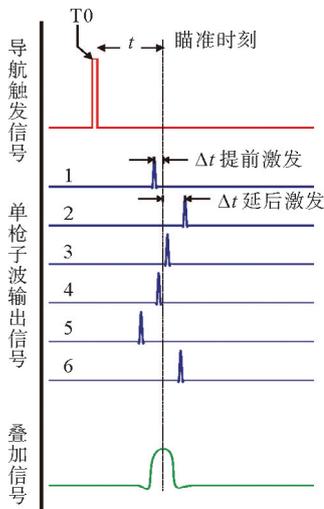


图4 非同步激发

Fig.4 non-synchronized firing

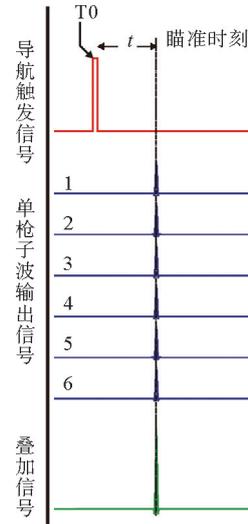


图5 同步控制激发

Fig.5 Synchronized firing

误差在 $\pm 0.5 \text{ ms}^{[9]}$ 以内。此外,为了对组合气枪阵列中气枪的自激、不激发、不同步等工作状态进行实时监控,气枪控制系统还需要采集气枪沉放深度、工作压力和近场子波等数据。

4 空气枪震源控制系统的发展

空气枪震源经过多年的发展之后,在结构形式方面,由单枪震源发展到相干式、调谐式以及两者相互组合等阵列震源;在空间布置方面,由传统的平面震源发展到立体震源;在源的数量方面,由单、双源发展到三源及更多源;在激发模式方面,由常规同步激发发展到延时激发以及随机激发等激发模式。为适应和满足空气枪震源理论和技术发展的需求,空气枪震源控制系统也在不断发展。根据系统结构和数据传输方式等的不同,当前市场上逐渐形成了模拟式和数字式等两种类型气枪控制系统。

4.1 模拟式气枪控制系统

模拟式气枪控制系统结构简单,其控制电路和辅助道采集电路都在地震勘探船仪器室内,下行控制指令和上行辅助道数据都为模拟信号。主要代表产品有美国 Macha 公司的 TGN^[10-11]、法国 Sercel 公司的 GCS90^[12]、英国 Seemap 公司的 GUNLINK2000^[13] 和美国 RTS 公司的 BIG-

SHOT^[14-15]等。

4.2 数字式气枪控制系统

数字式气枪控制系统的主要采用水下分布式布置,将气枪控制数据采集电路模块置于水下气枪处,整个系统可以视为一套小型分布式数字地震仪。数字式气枪控制系统主要代表产品有 Schlumberger 公司的 TRISOR^[15-16],原 ION 公司的 DIGISHOT^[17-18]、Seamap 公司的 GUN-LINK 4000^[19]以及 BOLT 公司研制开发的 SmartSource^[20-21]等。其中以 Seamap 公司的 GUN-LINK 4000 数字气枪控制系统为领导品牌,代表着数字式气枪控制系统的主流发展方向。

4.3 模拟式和数字式气枪控制系统的比较分析

在系统结构方面,由图 6 所示,各种模拟式气枪控制系统结构类似,其控制电路和辅助道采集电路均为机架式封装,都安装在海洋调查船的仪器室内。由图 7 所示,数字式气枪控制器主要由水下气枪控制模块组成,各个气枪控制模块安装

在水下气枪阵列上,且都集成深度、压力和近场子波等传感器接口。模拟式气枪控制系统需要将水下气枪阵列上的每只气枪和传感器用不同的线缆反复套结起来,每一串枪阵需要一套章鱼线缆,水下线缆连接复杂,水密插接件多,故障率高,拖带阻力大。数字式气枪控制系统由于采用水下分布式布置,每串气枪阵列只需要一根大线将气枪控制和信号采集模块串接起来即可,减少了线缆数量,进而降低由水密连接造成的故障率。

在信号采集和传输方面,模拟式气枪控制系统的控制指令和水下辅助道数据均为模拟信号,通过炮缆铜线传输,在恶劣的采集环境下^[23],模拟信号易被干扰和发生畸变,影响气枪同步控制精度。受气枪炮缆芯数和长度的限制,模拟式气枪控制系统只能采集少量的深度、压力和近场等辅助道信号用于震源质量监控。数字式气枪控制系统将气枪控制和辅助道信号采集单元置于水下气枪处,由于更靠近模拟端,可提高同步控制精度和信号采集质量。同时数字信号传输可采用光纤炮缆传输,炮缆可以做的更细更长,以便获得更小



Macha TGN



Sercel GCS90



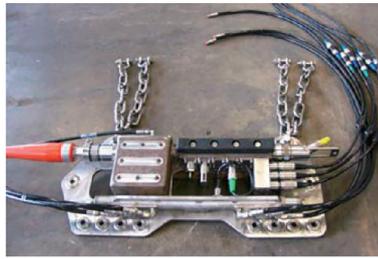
Seamap Gunlink 2000



RTS Bigshot

图 6 模拟式气枪控制器

Fig.6 Analog air gun controller



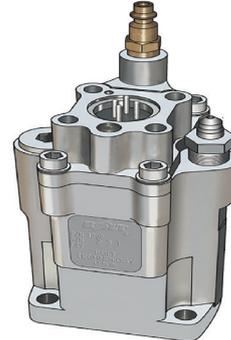
TRISOR 水下枪控模块



DigiShot 水下枪控模块(PGCM)



Gunlink 4000 水下枪控模块(GFSM)



SmartSource 水下集成电磁阀

图7 数字式气枪控制器

Fig.7 Digitized air gun controller

的偏移距甚至零偏移,在单船拖缆地震采集中可得到更多的近道数据。目前在全球新建三维地震勘探船市场,数字式气枪控制系统成为主流应用,传统模拟式气枪控制系统已被淘汰。

5 Gunlink4000 数字式气枪控制系统的应用

地震勘探是海洋地质调查的重要手段。当前海洋地震勘探已由常规的单源单缆、双源多缆等,向多源(两源以上)多缆发展。作为“海洋地质九号”综合物探船多道地震采集系统重要装备之一,青岛海洋地质研究所于2017年引进Seamap公司的Gunlink 4000数字式气枪控制与数据采集系统,使“海洋地质九号”船的空气枪震源系统达到国际先进水平。“海洋地质九号”船配备6排组合气枪阵列。通过数字光纤炮缆传输控制指令和 underwater 数字化的深度、压力和近场子波等信号。系统集成远场子波合成计算软件,逐炮采集近场子波信号进行远场子波^[24]合成计算,对震源子波质量进行实时监控。Gunlink 4000枪控系统具备多源控制能力,可跨阵列选择任意气枪组成震源,还

支持配置单只气枪为一个单独震源。整套系统可满足海洋拖缆、海底电缆、海底地震仪和海底节点的2D、3D、4D等多种地震采集作业模式需求。

5.1 Gunlink 4000 数字式气枪控制系统在海洋立体震源观测中的应用

目前海上空气枪震源除了传统的平面枪阵外,李绪宣等^[25]等通过数值模拟研究了三子阵立体阵列的远场子波特征,展示了立体阵列明显优于平面阵列。由于海面虚反射等因素引起的陷波作用在立体枪阵中可以得到很好的抑制,同时立体枪阵可以提高子波的高频能量,并使频谱更加光滑。立体阵列组合技术是在多个阵列组合的基础上,利用各子阵不同沉放深度设置不同的时间延迟激发,以达到增强激发子波初峰值能量、减弱虚反射等效果的一种技术(图8)。具体设计时,根据调查海区声速以及叠加原理,各子阵沉放深度从小到大依次设置相应的激发延迟时间,最终达到激发子波初峰同向叠加而增强,而虚反射非同向叠加而抑制的目的^[26]。Gunlink 4000数字式枪控系统具备的多源配置功能,支持更多沉放深度的立体震源组合,可使震源频谱更为光滑,扩

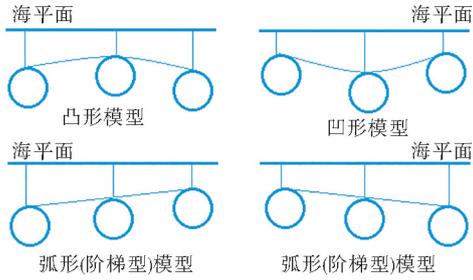


图 8 几种不同组合形式的立体阵列模型(据文献[24])

Fig.8 Three-dimensional air-gun array model in different combination (from reference [24])

展了频谱宽度,丰富了地层分辨力。除简单的延时激发,Gunlink 4000 数字式枪控系统可为单源配置独立瞄准时间的功能,可获得更为精确的激发时间控制,达到提高立体震源子波峰峰值的目的,进而增强对中深层地层的探测能力。

5.2 Gunlink4000 数字式气枪控制系统在海洋多源激发地震采集中的应用

挪威海洋地球物公司 Polarcus 公司同样采用 Seamap 公司的 Gunlink 4000 数字式气枪控制系统。以其三源地震采集技术为例。图 9 所示为传统双源采集模式(Flip-Flop 激发),图 10 所示为 Polarcus 公司采用的三源采集模式(Flip-Flop-Flap 激发)。对 2 种采集模式进行比较可知,在相同线宽的情况下,可减小面元宽度,增加地层的横向分辨率;在保持横向面元宽度不变,增加阵列扩展宽度的情况下,可提高采集效率。

基于“海洋地质九号”船现有六排枪阵配置,可充分利用 Gunlink 4000 枪控系统的多源控制功能,实施三源采集作业,提高勘探精度和效率。

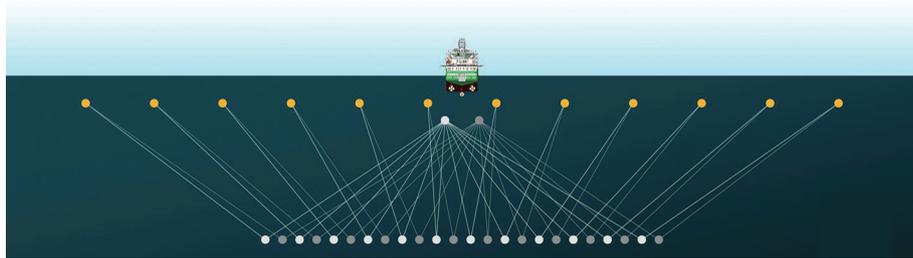


图 9 双源拖缆地震采集

Fig.9 Data acquisition by towed streamer seismic with dual-source

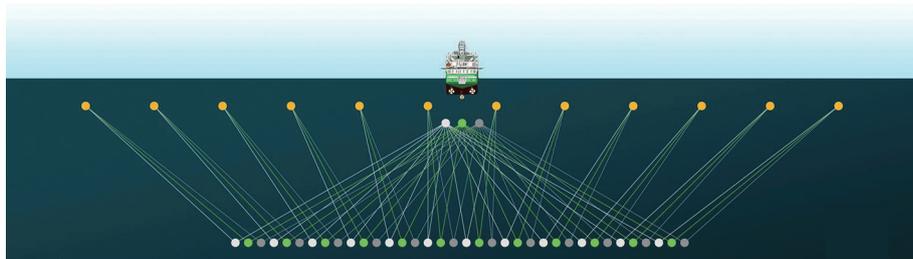


图 10 三源拖缆地震采集

Fig.10 Data acquisition by towed streamer seismic with three sources

5 结论

海洋多道地震采集主要围绕着质量和效率间的平衡进行着不断的努力。气枪控制系统是多道地震采集系统的重要组成部分,更是影响着野外

采集数据质量和工作效率的关键因素。由空气枪控制系统的发展,并结合当前行业应用需求情况,推测空气枪控制系统的发展方向和特点如下:

- (1)采用模块化集成的水下分布式系统结构;
- (2)水下信号采集和信号传输实现全数字化;
- (3)具备实时的远场子波合成计算功能;

(4)具备三源及以上的多源控制功能;

(5)具备同步激发^[27]、延时激发和随机激发等多种灵活的激发模式。

参考文献:

- [1] 魏合龙,孙记红,苏国辉,等.数字海洋地质工程建设进展[J].海洋地质前沿,2018,34(3):1-7. DOI: 10.16028/j.1009-2722.2018.03001.
- [2] 裴彦良,王揆洋,李官保,等.海洋工程地震勘探震源及其应用研究[J].石油仪器,2007,21(2):20-23,98.
- [3] 陈浩林,全海燕,於国平,等.气枪震源理论与技术综述(上)[J].物探装备,2008,18(4):211-217.
- [4] 罗桂纯,葛洪魁,王宝善,等.气枪震源激发模式及应用[J].中国地震,2007,23(3):225-232.
- [5] 杨怀春,高生军.海洋地震勘探中空气枪震源激发特性研究[J].石油物探,2004,43(4):323-326,4.
- [6] 张鹏,李欣,杨凯,等.海洋空气枪点震源阵列优化组合设计与应用[J].石油物探,2015,54(3):292-300.
- [7] 曾令龙.物探技术的现状与发展方向[J].海洋地质前沿,2007,23(6):37-42.
- [8] Ziolkowski A, Parkes G, Hatton L, et al. The signature of an airgun array-computation from near field measurements including interactions[J]. Geophysics, 1982, 47(10):1413-1421.
- [9] 陈浩林,全海燕,於国平,等.气枪震源理论与技术综述(下)[J].物探装备,2008,18(5):300-308,312.
- [10] 高增会,李海军,刘军. Macha TGN 气枪控制器的综合开发利用[J].物探装备,2006,16(3):168-171.
- [11] 美国 Macha 国际公司. TGN 产品手册[Z]. 文档序号 A121595,2012.
- [12] 钱慧石,程思. GCS90 气枪控制器工作原理及故障分析[J].物探装备,2009,19(5):308-310.
- [13] 英国 Seamap 公司. Gunlink 2000 产品手册[Z]. 手册编号:11-00-1028-A,2011.
- [14] 李亚夫,高斌,高增会. BIGSHOT 气枪控制系统及其应用[J].石油科技论坛,2011,30(5):33-35+68.
- [15] 美国 RTS 公司. Bigshot 产品手册[Z]. 手册编号:0412,2015.
- [16] 於国平. TRISOR 数字气枪震源控制系统介绍[J].物探装备,2006,16(3):239-242.
- [17] 美国 Schlumberger 公司. TRISOR 产品手册[Z]. 手册编号:06-FE-178,2006.
- [18] 美国 ION 公司. DigiSHOT System 产品手册[Z]. 手册编号:110920_rev1,2011.
- [19] 黄晓军. DIGISHOT 数字式震源控制器简介[J].物探装备,2007,17(1):77-78.
- [20] 英国 Seamap 公司. Gunlink 4000 产品手册[Z]. 手册编号:11-00-1028-A,2015.
- [21] 李海军,高乐,高斌,等. SmartSource 气枪震源控制系统简介[J].物探装备,2017,17(5):311-316.
- [22] 美国 RTS 公司. SmartSource System 产品手册[Z]. 手册编号:0415,2015.
- [23] 张训华,吴志强,肖国林,等.南黄海前新生代油气地震勘探面临的问题与努力方向[J].海洋地质前沿,2014,30(10):1-7.
- [24] 赵秀鹏.海洋气枪震源组合及子波模拟[J].油气地质与采收率,2004,11(4):36-38,83.
- [25] 李绪宣,温书亮,顾汉明,等.海上气枪阵列震源子波数值模拟研究[J].中国海上油气,2009,21(4):215-220.
- [26] 唐松华,李斌,张异彪,等.立体阵列组合技术在南黄海盆地的应用[J].海洋地质前沿,2013,29(5):64-69.
- [27] 王兴芝,黄兆林,付琛,等.海洋深水地区地震数据采集技术[J].海洋地质前沿,2011,27(10):59-63.

DEVELOPMENT AND PROSPECT OF AN AIR GUN SOURCE CONTROL SYSTEM

ZHANG Shiyang

(Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China)

Abstract: Marine seismic survey is the critical component of marine geological survey and the air gun control system is the key to its source system. In this paper, we made an introduction to the composition, basic principles and application status of the air gun source control system. Future development trend is also discussed and predicted.

Key words: air gun seismic source; marine geological survey; marine seismic survey; air gun control system