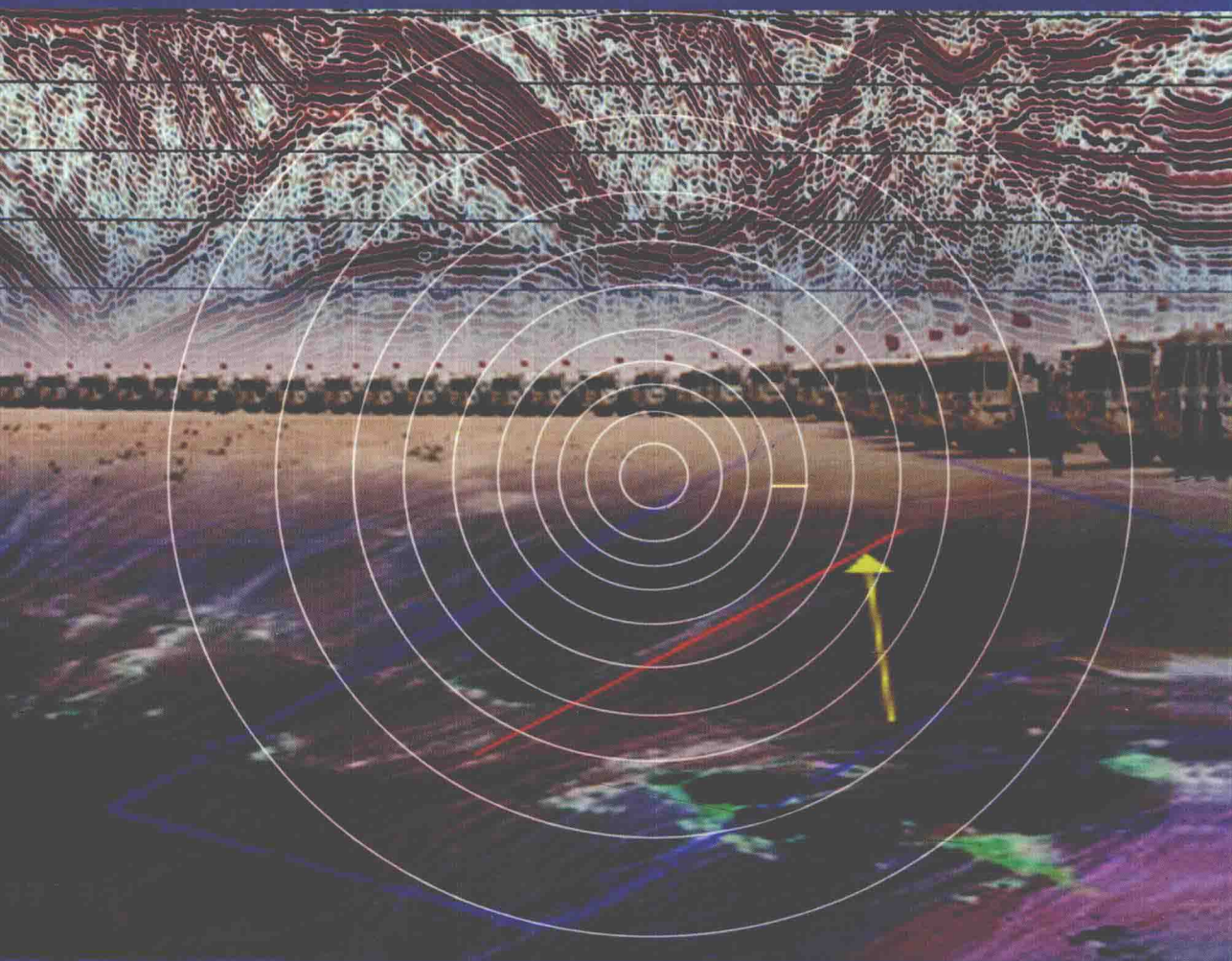


地震源 地震勘探采集技术

倪宇东 ◎ 等编著



石油工业出版社

可控震源地震勘探采集技术

倪宇东 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了可控震源的基本结构及工作原理、常规采集方法、高效采集技术、高保真采集技术。作为可控震源地震勘探系统工程的一部分，书中还介绍了测量、采集仪器和质量控制等技术。本书最后介绍了可控震源地震勘探采集技术发展趋势，认为“高效、高保真、低频（宽频）”三项技术相融合是可控震源地震勘探采集技术的发展方向。

本书着重介绍了地震勘探工程实用技术，可供地震勘探现场工作人员和大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

可控震源地震勘探采集技术/倪宇东等编著.

北京：石油工业出版社，2014.6

ISBN 978-7-5183-0196-6

I. 可…

II. 倪…

III. 震源—地震勘探

IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 098500 号

出版发行：石油工业出版社

（北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011）

网 址：www.petropub.com.cn

编辑部：（010）64523533 发行部：（010）64523620

经 销：全国新华书店

印 刷：北京中石油彩色印刷有限责任公司

2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本：1/16 印张：10

字数：260 千字

定价：98.00 元

（如出现印装质量问题，我社发行部负责调换）

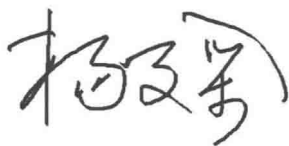
版权所有，翻印必究

进入 21 世纪,我国能源及矿产资源供需矛盾日益突出。据中国工程院预测,到 2020 年,我国重要战略资源对外依存度会很高,石油、铁、铜等将超过 60%。面对 21 世纪能源与矿产资源的挑战,必须发展高精度地球物理探测技术对地球内部进行探测,揭示地下能源资源与矿产资源分布规律。

勘查地球物理学是地球物理学的重要分支,它运用物理学的原理、方法和观测技术寻找矿产资源,探查地下隐伏的目标。地球物理探查主要包括数据采集、数据处理和结果解释三个步骤,其中数据采集是所有探查工作的基础。目前,在地球物理探测技术中,最先进的方法仍是地震探测。在所有勘查地球物理方法中,反射地震勘探是分辨率最高和应用最广泛的方法,在石油、天然气和煤田勘探、工程勘察和矿产勘探中都有广泛应用。近年来,国内外反射地震数据采集技术取得了较大进展,采集技术设计和优化日益受到重视。应用可控震源高效采集技术和低频采集技术可以实现高密度和宽频域反射地震数据采集,不仅可以降低成本,而且利于环境保护,提高勘探效果。《可控震源地震勘探采集技术》一书系统阐述了可控震源地震勘探常规采集方法、高效采集技术、高保真采集技术,以及技术发展趋势。这本书的出版,对于促进我国反射地震采集方法技术的进步非常有益。

经过 50 年来几代地球物理学家的共同努力,我国已经成为陆上地球物理勘探第一大国,中国的地球物理服务公司在世界陆上地球物理勘探市场取得的份额最高,近年连续超过世界陆上合同总额的 20%。中国石油天然气集团公司下属的东方地球物理勘探有限责任公司陆上地球物理勘探合同额居世界第一,本书主要作者倪宇东正是东方地球物理勘探有限责任公司采集技术支持部的总工程师。非常高兴看到他书写与读者分享他的经验,推进地球物理勘探事业的发展。

中国科学院院士



2013 年 12 月 7 日

可控震源地震勘探技术是地震勘探技术的重要组成部分。可控震源地震勘探技术具有“安全、环保”的特点，其激发的扫描信号出力大小、扫描时间、相位、频率等参数可根据不同工区地表条件、深层地震地质特征的不同而调整。正是由于这些优点，可控震源地震勘探成为地震勘探重要组成部分。特别是在 2000 年前后的 20 年中，随着地震记录仪器装备的跨越式进步，可控震源地震勘探技术得到了突飞猛进的发展。笔者多年从事地震勘探采集技术研究工作，在 2012 年前后，组织了相关专家对笔者多年调查、研究的成果进行了补充与完善，完成了本书的编写工作。可控震源又分为纵波可控震源、横波可控震源、多波可控震源等，本书只介绍纵波可控震源地震采集方法。

推广可控震源地震勘探技术是编写本书的重要目的。(1) 推广该技术符合“安全、环保”、“可持续发展”的要求；(2) 有利于推广使用“宽(全)方位、宽频、高密度三维地震勘探”技术，该技术是解决油气勘探精度要求的重要方法之一，但是其偏高的价格限制了它的使用，可控震源高效采集方法可以提高效率，合理控制成本，使“宽(全)方位、宽频、高密度三维地震勘探”成为“用得起”的技术；(3) 宽(全)方位、高密度三维地震勘探的推广使用提供了高精度的地震资料，满足了油气勘探的需求，加快了油气勘探的进程，符合国家能源战略要求；(4) 通过总结、研究工作可以带动新一轮地震勘探部署，解决从事地球物理勘探的企业面临的经营压力、解决企业员工的就业问题，具有良好的经济效益、社会效益。

全书包括绪论共分为八个部分。

绪论部分，重点回顾了可控震源的发展历程。

第一章主要介绍可控震源系统基本结构及工作原理。本章力求使读者能够基本了解可控震源的工作原理及系统本身的结构特点，从而确保在生产过程中正确使用可控震源，初步判断可控震源在生产过程中发生的故障，初步解决由于故障而产生的问题。本章主要由刘金中、王光德主笔，倪宇东对素材做了适当的编改工作。

第二章主要阐述可控震源地震勘探理论基础，包括地球物理褶积模型、扫描信号分类、相关方法，以及可控震源原始地震资料噪声分析。这一部分从对比炸药震源与可控震源地震勘探的数学物理模型出发，阐述可控震源地震勘探的物理含义。这一章是可控震源地震勘探的理论基础，无论是可控震源常规采集还是高效采集，都需要把扫描信号与振动记录做互相关处理，从而压缩振动记录，获得通常意义的单炮记录。本章主要由倪宇东编写。

第三章介绍可控震源常规采集方法。重点介绍了观测系统参数选择、扫描信号参数选择、野外生产基本流程、典型实例等内容。本章主要由倪宇东编写。

第四章主要介绍可控震源高效采集技术，包括交替扫描、滑动扫描、独立同步激发等技术的基本方法原理。可控震源高效采集技术必然带来相应的噪声，其中谐波噪声、邻炮

干扰是主要的噪声。本章介绍了谐波噪声、邻炮干扰产生的机理和特点,同时介绍了压制这两种噪声的几种方法。另外还介绍分析了国内外使用高效采集方法的典型实例。本章主要由倪宇东编写,梁晓峰、张建军分别在谐波压制和邻炮干扰压制技术方面做了补充。

第五章重点介绍可控震源高保真采集技术。可控震源高保真采集技术是可控震源地震勘探技术的重要组成部分,由于该技术需要记录地面力信号,因此没有得到大规模的应用。“十一五”期间,倪宇东作为主要技术负责人之一,带领科研团队深入开展了这项技术的野外试验及室内研究工作。本章重点介绍这项技术的基本原理及野外采集方法、数据分离技术、野外试验情况及效果。本章主要由倪宇东编写,雷云山、马涛在数据分离方法上做了大量的研究工作。

第六章重点介绍可控震源地震采集相应配套技术,主要包括通信、定位及导航技术,地震仪器、数据转储及质量控制方法等。由于涉及仪器专业、测量专业方面的知识,因此读者可以有选择地阅读本章内容。本章由刘金中、王光德、倪宇东、王井富共同编写。

第七章介绍了可控震源地震采集技术发展趋势。笔者认为,可控震源低频勘探技术、宽频及大吨位可控震源采集技术、高效与高保真融合技术是未来可控震源发展的方向。本章主要由倪宇东编写。

本书较为系统地介绍了可控震源地震勘探采集技术,希望能为在校大学生及硕士研究生、初步接触可控震源地震勘探的工程技术人员提供学习的基础素材,同时希望能够为致力于可控震源地震勘探技术研究的高级工程技术人员提供一个深入了解这项技术发展情况的捷径。

本书编写的内容还有很多不足之处,希望读者能够及时提出宝贵意见,以便笔者改正失误。本书最大的遗憾是没有介绍可控震源地震资料后期处理、解释技术,笔者希望今后有机会能够补充这一部分内容,以回报读者的信任。

在本书编写过程中,秦天才主任为本书的编写提供了良好环境,奠定了坚实基础;纪迎章、李海翔、李扬胜、吕哲健四位高级工程师参加了部分技术的研究工作和数据处理工作;任敦占、杨和平两位高级工程师给予笔者大量的建议与意见。本书引用了东方地球物理勘探有限责任公司塔里木物探处、吐哈物探处、新疆物探处、青海物探处,以及国际勘探事业部的成功实例,在此一并感谢!笔者对关心支持本书出版工作的东方地球物理勘探有限责任公司及其采集技术支持部、国际勘探事业部的领导专家表示衷心的感谢!

绪论	(1)
第一章 可控震源系统基本结构及工作原理	(3)
第一节 可控震源系统发展介绍	(3)
第二节 振动器及辅助系统	(4)
第三节 控制系统	(6)
第四节 相关器	(9)
第二章 理论基础	(10)
第一节 反射地震波场褶积积分模型	(10)
第二节 地震记录褶积模型	(12)
第三节 扫描信号	(15)
第四节 相关方法	(20)
第三章 常规采集方法	(26)
第一节 野外施工方法	(26)
第二节 主要观测系统参数设计	(28)
第三节 激发参数选择	(35)
第四节 相关记录主要干扰波分析	(40)
第五节 勘探实例分析	(43)
第四章 高效采集技术	(52)
第一节 引言	(52)
第二节 交替扫描采集方法	(54)
第三节 滑动扫描采集方法	(58)
第四节 独立同步扫描采集方法	(85)
第五节 距离分离同步扫描采集技术	(95)
第六节 其他高效采集方法介绍	(97)
第五章 高保真采集技术	(105)
第一节 引言	(105)
第二节 野外施工方法	(106)
第三节 数据处理方法	(107)

第四节 实例分析 (114)

第六章 配套技术 (122)

第一节 通信技术 (122)

第二节 定位及导航技术 (126)

第三节 源驱动技术 (128)

第四节 仪器记录系统及相关设备 (130)

第五节 现场质量监控技术 (132)

第七章 技术发展趋势 (135)

第一节 低频勘探技术 (135)

第二节 大吨位可控震源技术的发展 (143)

第三节 高效、高保真采集技术的融合 (145)

参考文献 (147)

绪 论

地震勘探技术是石油勘探领域不可缺少的技术之一。1919年,德国人 L. Mintrop 在德国申请了地震折射波法专利,开始了石油勘探的革命。1924年,利用地震折射波法在得克萨斯海湾发现了 Orchard 油田,这是世界上第一个利用地震勘探方法发现的油田。1922年,英国皇家学会会员 J. W. Evans 等人在英国申请的专利“地下构造研究改进方法”获得批准,该专利第一次明确提出反射波地震勘探方法,标志着地震勘探走向了反射波法时代。无论折射波法还是反射波法,都需要人工激发源激发地震波。人工激发源主要包括重锤、炸药震源、可控震源与气枪等。可控震源又分为纵波、横波可控震源。本书主要介绍纵波可控震源地震勘探方法。

可控震源地震勘探始于 20 世纪 50 年代的苏联及美国,至今已经有 60 余年的发展历史。20 世纪 50 年代末期,苏联首先研制了偏心轮振动器,而后又研制了液压式振动器。在此基础上发展了以激发编码信号为基础的可控震源地震勘探方法,苏联的可控震源地震勘探方法在 20 世纪 70 年代末期才真正走向工业化生产。美国大陆石油公司 (CONOCO) 在 1952 年开始了连续振动工作法试验,所谓连续振动工作法就是采用一个大质量的振动体,通过与大地紧密耦合的振动平板,向地下传送一组连续振动的弹性波信号,通过处理经过大地改造过的这组弹性波信号,获得与地下地质构造、地层岩性、地层含油气性等有关的信息。通常把产生连续振动信号的装置叫做可控震源。美国在 1956 年成立第一支可控震源地震队,同苏联一样直到 20 世纪 70 年代才开始真正现代意义的可控震源地震勘探生产。

可控震源地震勘探技术发展到今天,一般可以划分为三个阶段。第一阶段是试验阶段,时间段是从 20 世纪 50 年代开始到 60 年代末期。第一阶段是可控震源系统本身研发阶段,主要通过野外采集试验来发展与完善可控震源系统本身。第二阶段是大规模应用阶段,时间段是从 20 世纪 70 年代初到 80 年代末期。一般称该阶段为可控震源常规生产阶段,该阶段一般采用多台可控震源组合激发的方式,通过互相关处理方法获得野外单炮记录。常规生产阶段采用逐点依次激发的方式,野外生产效率低,在这一阶段的中后期,野外日生产炮数才刚刚达到 300~500 炮。第三阶段是可控震源高效采集阶段,时间段是从 20 世纪 90 年代初一直发展到现在。在这一阶段中,先后出现了交替扫描技术 (Flip - Flop Sweep)、滑动扫描技术 (Slip - Sweep)、独立同步扫描技术 (ISS: Independent Simultaneous Sweeping)、可控震源高保真地震勘探技术 (HFVS: High Fidelity Vibratory Seismic) 等。目前,可控震源高效采集方法最高日生产炮数可达 20000 炮以上。

可控震源地震勘探不仅具有“安全、环保”的特点,还具有出力大小、频率范围、扫描时间、相位等参数可根据具体的工区地表条件、深层地震地质条件而调整的特点。正是由于这些特点,可控震源在地震勘探领域占据重要的位置。1975 年美国陆上地震勘探总工作量的 43% 是利用可控震源采集的;2009 年上半年,全球陆上地震勘探工作量的 80% 是使用可控震源完成的。我国在 1975 年首次引进美国 Geospace 公司的 12 台 M10/601 可控震

源,并于1976年第一次在玉门酒西、花海盆地开展了试验工作。从1976年到2012年,可控震源在我国石油勘探领域发挥了巨大的作用,尤其是在中国西部复杂山地山前带巨厚砾石发育区的使用,为我国西部前陆盆地油气勘探的重大发现发挥了重要作用。1976年在玉门采用的是30000lb的可控震源,激发参数采用了4台组合激发、10~20次扫描方式,扫描频率是13~52Hz、扫描长度是10~22s。这种激发方式意味着平均每获得一张单炮记录需要100~440s(没有计算每个振次间的等待时间和炮点之间的搬家时间)。目前国内普遍采用了60000lb的可控震源,野外一般采用2~4台组合激发、2~4次扫描的方式。从2010年以后,开始尝试并逐步采用一次扫描的方式,扫描频率一般在6~96Hz、扫描长度一般在10~14s。这就意味着平均每获得一张单炮记录需要10~14s(同样没有计算每个振次间的等待时间和炮点之间的搬家时间)。对比1976年与2010年前后的方法,不难看出,由于可控震源系统本身的进步,直接带动了生产方式、生产效率的改进,当然这其中也有记录仪器系统发展的贡献。

国内在可控震源使用上与国外有很大的差距。笔者曾在2009年对比了东方地球物理勘探有限责任公司2004年到2008年承担的国内外地震勘探项目可控震源的使用情况:国内一共有531个地震勘探项目,使用可控震源的项目为44个,比例仅仅为8.3%;国际一共413个项目,使用可控震源的项目为234个,比例为56.5%;国内44个项目中面积超过500km²的仅仅占6.8%,国际234个项目中面积超过500km²的占到47.5%;国内可控震源项目多在戈壁区,占总项目的68.2%,沙漠使用可控震源的项目仅仅为4.4%;国外可控震源项目以沙漠地区为主,占总项目的40.3%,戈壁使用可控震源的项目为34.0%。国内使用可控震源项目多以常规采集技术为主,2010年以后才尝试使用交替扫描与滑动扫描技术,而国外已经广泛使用滑动扫描技术,并发展了多种高效采集技术。

中国发展到今天,越来越重视和谐社会的建设,越来越重视科学发展。“安全生产、绿色环保”已经成为社会最为关注的主题,可控震源在国内大规模推广使用恰恰符合这一主题的要求。随着可控震源新技术的发展,“安全、环保”的可控震源必将代替大部分炸药震源。

第一章 可控震源系统基本结构及工作原理

按照激发地震波的类型,可以把可控震源分为纵波可控震源、横波可控震源、纵横波可控震源。其中纵波可控震源在世界范围内数量最多、应用最普遍。本章主要介绍纵波可控震源基本结构及工作原理。

第一节 可控震源系统发展介绍

可控震源系统研制始于 20 世纪 50 年代的苏联及美国,开始批量生产并实现工业化应用是在 20 世纪 70 年代,业界把 70 年代以后的震源系统称为现代可控震源系统。现代可控震源系统具有如下特点:振动系统采用液压伺服控制的振动器,其激发频率和激发能量容易调整,激发信号同步控制精度提高,可以采用多台同步垂直叠加方式进行作业,大部分可控震源开始采用单独设计的专用承载底盘,这使得可控震源在野外复杂地表条件下行驶通过能力大大提高。随着勘探深度不断增加和对资料高分辨率的追求,可控震源从早期的 20000lb 峰值出力能力已经发展到具有 90000lb 峰值出力能力,相位控制也已经从最初的 90°发展到 1°。相位控制是一个非常重要的指标,它体现了可控震源对其激发的信号波前相位变化的控制能力以及对激发信号频率变化的控制能力。控制能力越强,震源组合激发同步效果越好,越有利于增加激发能量、增大勘探深度、实现高精度同相叠加。

从表 1-1 可以看到,可控震源技术每隔 10 年就有一个大的进步。20 世纪 70 年代以前,苏联 CB 液压型可控震源为代表的可控震源峰值出力仅仅为 10000lb,相位控制能力仅仅为 90°,经过 40 年之后,以法国 Sercel 公司 Nomad90T 为代表的可控震源出力已经达到峰值 90000lb,相位控制精度达到 1°。业界通常把峰值出力大于等于 60000lb 的可控震源称为大吨位可控震源。目前生产可控震源的厂商主要有中美合资的 Inova 公司、法国 Sercel 公司、美国 IVI 公司、俄罗斯 Geosvip 公司、美国 Seismic Source 公司、东方地球物理勘探有限责任公司(BGP,简称东方地球物理公司)。目前主流可控震源峰值出力为 60000lb、扫描频带为 6~250Hz。2000 年以来,法国 Sercel 公司推出了 90000lb 可控震源、ION 及 BGP 也相继推出 80000lb (40t) 可控震源。图 1-1 是三种具备不同峰值出力的可控震源。可控震源在衡量振动能力方面的主要技术指标包括峰值振动输出力、最大静载荷压重、最低频率、重锤质量、平板质量等,在描述运载底盘方面包括动力类型及动力值、整车整备质量、外形尺寸、通过能力等指标。

可控震源系统本身非常复杂,包括电控系统、液压伺服系统、动力系统、传动系统、辅助系统等。对于专门从事石油地球物理勘探的工程师来讲,了解上述各子系统的基本功能原理虽然是必要的,但更需要了解可控震源系统是如何完成地震勘探工作的。从这一角度分析可控震源系统,就可以把它分解成三大部分:可控震源振动系统、控制系统、相关器及其他辅助系统。本章简单介绍这三个部分的构成及工作原理。

表 1-1 不同年代可控震源峰值出力、相位控制能力

项 目	20 世纪 60 年代	20 世纪 70 年代	20 世纪 80 年代	20 世纪 90 年代	21 世纪
峰值出力 (lb)	10000	30000	50000	60000	90000
相位控制 (°)	90	20	10	1	1

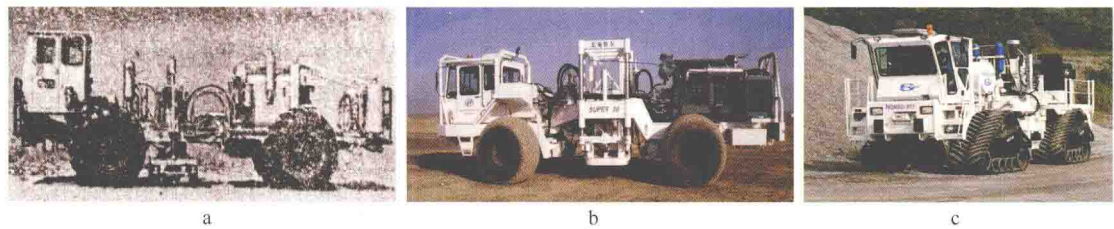


图 1-1 三种典型的可控震源

a—20 世纪 70 年代美国 19000lb Y900 可控震源；b—东方地球物理公司 60000lb KZ28 铰接型可控震源；
c—为法国 Sercel 公司 90000lb Nomad90T 可控震源

第二节 振动器及辅助系统

一、振动器及工作原理

可控震源振动系统的核心部分之一是振动器。虽然各个厂家、各个型号的可控震源的振动器结构不同，但主要组成部分和工作原理是相似的，一般振动器主体由反作用重锤、平板、活塞杆、隔振空气气囊、定心空气气囊、平衡拉杆、框架等组成（图 1-2）。可控震源勘探用的连续振动扫描信号就是由电控箱体控制、由振动器发出并传入大地的。基本工作原理如下：可控震源上安装的电控箱体根据扫描参数置入情况产生扫描参考信号，该信号是只有数十毫安的微弱电信号，该信号输入到振动器上安装的电液伺服阀，电液伺服阀把这个微弱电信号转换成相应液压油流信号并进行功率放大，这些高压、大功率的液压油流就随着这个电信号的极性和强弱变化而交替进入重锤内部液压缸的上腔或下腔，从而驱动重锤沿着重锤活塞杆加速向上或向下运动，重锤活塞受到重锤液压腔内的液压油反作用

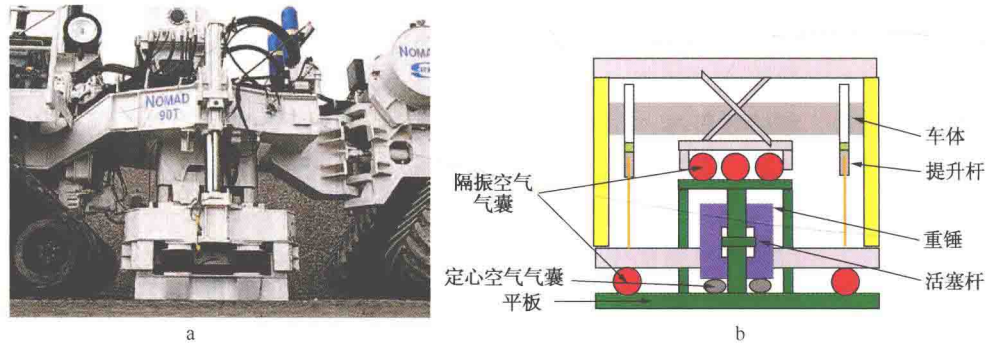


图 1-2 振动器实物图 (a) 和振动器结构示意图 (b)

力而产生与重锤相反方向的加速度,因震源平板与重锤活塞杆刚性连接在一起而具有与重锤活塞同样的加速度。振动器上的平板加速度、重锤加速度、重锤相对于平板的位移、电液伺服阀三级阀芯的位移情况均通过安装的传感器检测并实时传给电控箱体,电控箱体通过这些反馈信号实时掌握振动器工作状态,并调整输出到电液伺服阀的信号以确保振动器的振动扫描信号是符合前期设计好的地震勘探需要的扫描信号。振动器平板在震源工作中是以设定的压重压力被紧紧的压在地面上,重锤加速度和平板加速度的矢量和引起平板对大地的压力变化,这个压力变化就被平板下的近地表弹性介质转换为弹性振动波而向地下传播开去。这个振动波信号就是平常所说的地面力信号。不考虑震源液压系统压力变化和液压油泄漏等因素,可控震源地面力可简单地表示为震源重锤加速度和平板加速度分别与重锤和平板质量乘积的加权和,即

$$GF = M_m A_m + M_{BP} A_{BP} \quad (1-1)$$

式中: GF 为可控震源输出地面力; M_m 为重锤质量; A_m 为重锤加速度; M_{BP} 为平板质量; A_{BP} 为平板加速度。

在这个表达式中,重锤质量 M_m 和平板质量 M_{BP} 不变,变量为重锤与平板的加速度,它们可由分别安装在重锤和平板上的加速度传感器测得,其加速度幅值变化大小取决于流入重锤油缸内液压油流的变化。一般该值等于或小于震源最大静载荷压重与震源名义振动输出力二者间的最小值。

二、运载底盘及其他部分

承载振动器的是可控震源的运载底盘。目前大吨位可控震源的运载底盘都是采用特殊设计的专用运载底盘,这类底盘结构强度高、野外施工通过能力强、可靠性高。大吨位可控震源底盘的驱动系统都采用闭式液压驱动系统,可控震源的前、后桥分别由两套独立的泵、马达组成闭式驱动回路进行驱动(Nomad65 可控震源采用一个驱动泵)。每个回路包括一个变量泵、一个变量马达、一个变速箱和驱动桥。动力传递路线是:发动机—分动箱—液压泵—液压马达—变速箱—传动轴—驱动桥—轮胎。

大吨位可控震源需要较大的功率,采用柴油发动机作为动力源,一般常用卡特彼勒公司的 3406C 柴油发动机和 C13、C15 电喷柴油发动机,底特律公司的 S60 系列电喷柴油发动机。少量震源还选用了其他一些型号发动机。

为了保证可控震源能正常工作,可控震源中还有大量直流电路控制系统、气压控制系统、辅助液压控制系统等。上述内容的详细深入介绍请参阅相关专业书籍,在此不再做重复介绍。

三、重要概念

液压峰值力 (HPF): 它等于其振动器重锤活塞面积 (S) 与震动液压系统高、低压力差 ($p_h - p_l$) 的积。该参数表征了可控震源理论上的最大激发能力。

静载荷压重 (HDW): 由于可控震源是采用反作用原理工作的,因此,可控震源的最大静载荷压重是指可控震源所能提供的保证振动器平板在激发过程中不发生脱耦的最大下压力。在扫描过程中,平板一定要与大地保持紧密接触,因此静载荷压重必须要大于等于液压峰值力。因为重锤与平板的重量之和一般不会超过 5~6t,因此,单靠重锤与平板的重

量是难以满足这个要求的。为了能够达到静载荷压重的要求,通常设计都利用可控震源车身的一部分质量。这一参数是可控震源实际所能产生的最大有效激振力的极限值。如果激发过程中可控震源产生的振动输出力超过该值,则该次振动记录将有可能成为废品。原因是当震源在激发过程中的输出力超过该值时震动平板有可能会产生脱耦现象。由于脱耦,在记录上将会出现一系列连续的“落重”脉冲,这样的记录经过相关处理后,从脉冲产生处开始,将会形成一些倒序的扫描信号,由于这些倒序扫描信号的影响,将严重屏蔽地下有效的反射信号。另外,由于该值与可控震源提升系统的调定压力、整车质量(三分之二的燃油、液压油额定质量)有关,因此,野外实际使用中往往小于该值,所以为了保证震源在振动过程中不出现震动平板与地面脱耦的风险,许多控制系统在使用该参数时自动将该参数缩小10%,因此当最终质量控制数据显示检测的振动输出力振幅达到100%时,实际的振动输出力仍然不超过可控震源的最大静载荷压重。

可控震源振动器等效平板质量:可控震源的等效平板质量的设置将影响系统控制的计算精度,错误的设置将通过系统对输出力和相位的计算控制,影响可控震源的激发效果。由于振动平板上还有一些附加结构,因此在计算平板质量时,通常要考虑到这些附加部分的质量,所以平板质量的规范称谓是等效平板质量。

可控震源的实际振动输出力:在可控震源实际应用过程中,很多人对可控震源的实际振动输出力到底是多少有些困惑,认为标称28t级的可控震源出力就应该达到28t,震源出力设置就应该是100%而不是现行的70%。实际上震源出力70%是指地面力的基波成分能量要达到峰值力或最大静载荷压重的70%,而震源激发的实际出力中基波只是其中一部分能量,还包括畸变能量成分。

第三节 控制系统

一、控制系统组成

可控震源控制系统包括安装在每台可控震源上的电控箱体及各种传感器,还包括安装在数据采集系统上的编码器。

作为地震勘探机械式激发源的可控震源系统与炸药震源一样都需要产生向地下传播的激发信号。可控震源系统产生的是具有一定延续时间的连续振动信号,称为扫描信号或真参考信号,而炸药震源产生的是脉冲信号。电控箱体安装在每台可控震源驾驶室内,其主要作用是:产生地震勘探所需要的连续振动信号;精确控制震源振动信号的相位与振幅;产生精确的同步启动信号;实施震源振动性能的质量监视。为了控制可控震源实现扫描功能,在可控震源上安装有电液伺服阀,用以将电控箱体输出的数十毫安的微弱电控制信号转换成相应液压油流信号并进行功率放大以驱动可控震源的振动器产生地震勘探需要的扫描信号。在对可控震源进行扫描控制的过程中,电控箱体需要实时掌握振动器振动状态信号,这些信号包括:重锤加速度信号,平板加速度信号,重锤位移行程信号和三级电液伺服阀阀芯位移行程信号。这样,在可控震源振动器上,重锤上安装重锤加速度表检测重锤加速度;平板上安装平板加速度表检测平板加速度,重锤与平板之间安装重锤位移传感器检测重锤相对于平板的位置;在伺服阀的三级电流放大阀上安装有阀位移传感器以检测其

阀芯位置。在可控震源工作过程中,这些传感器检测到的信号实时传给电控箱体,使电控箱体了解可控震源振动器对送入到伺服阀力矩马达中的电流信号是如何进行响应的,以调整下一步送到力矩马达的电流,使可控震源产生的机械振动信号符合要求。在整个扫描过程中,电控箱体利用上述两个加速度信号实时计算实际出力情况,并与其内部的参考信号比较生成该次扫描的质量控制报告。

编码器安装在地震仪器车上,它的主要功能是:产生用于相关的真参考信号,通过数据采集系统与各检波点记录的振动信号进行实时相关处理以获得相关地震记录;对所有的震源进行遥控参数装载;控制参加施工的震源同步启动;通过无线电接收震源的实时监控数据进行质量实时控制等。

目前国际上常见的可控震源控制系统主要有两种:第一种是 Inova 公司提供的 ADV 系列;第二种是 Sercel 公司提供的 VE 系列。这两个系统的设计思路与系统结构差异较大,都有不同于彼此的特点。

二、VIB PRO 电控系统

VIB PRO 可控震源控制系统也称为 ADVIII,是中美合资 Inova 公司生产的,其早期的产品分别称为 ADVI、ADVII,这两种型号产品目前均已淘汰。该系列产品最早由美国 Pel-ton 公司研发制造,现该公司归属 Inova 旗下。VIB PRO 可控震源控制系统通常包括一个编码器和数个电控箱体以及相应加速度表和控制缆线等。其编码器全称为编码扫描发生器(encoder sweep generator,缩写为 ESG),施工时配置在数据采集系统上,完成可控震源和数据采集系统的同步控制与数据通信,并产生与记录在数据采集系统数据道的信号进行相关处理的真参考信号源;电控箱体全称为可控震源控制箱体(vibrator control electronics,缩写为 VCE),配置在可控震源上,完成对可控震源输出信号的控制,并将控制结果传回到 ESG。其设计理念是编码器与电控箱体具有相同的架构和外形,可以通过其设置界面手动进行编码器与电控箱体之间的转换(图 1-3a)。

作为使用者来说,VIB PRO 系统区别于 VE 系列电控箱体的主要特点在于:控制模型不同于 VE 系列电控箱体;软件界面上,VIB PRO 系统给了使用者更多的空间对可控震源的各种控制和扫描参数进行设置,同时扫描参数设置、标定等都可以直接通过箱体执行,而 VE 系列电控箱体必须通过手部才能对其进行相应的操作;可以作为 Shot ProTM 编码器使用;带有内置或外置 GPS 选项,VIB PRO 系统可以提供精确的时间和 GPS 定位信息,在地图上也可以支持导航功能,实时的 GPS 导航显示在计算机屏幕上。

在扫描作业期间,VIB PRO 系统可以进行许多项目的测试。测试分析结果由箱体传回编码器,这个报告叫做扫描事后服务报告,简称 PSS 报告。编码器和所有箱体的 PSS 报告在扫描完成后,相继显示在与编码器相连的计算机显示器上。系统自动把 PSS 报告的结果与操作员输入的参数/性能误差容限作比较,当超出这个限度时,在显示器上报告错误信息。因为 PSS 系统自动完成了对震源性能综合的测试,所以现在很少再做传统的模拟信号一致性检查。

在使用 VIB PRO 电控箱体时,不管是不是与 VIB PRO 兼容的仪器,一般都会选配一个计算机与编码器相连接,计算机是用来控制编码器的操作,为所有震源加载参数、记录和显示 PSS 信息、分析电台一致性。可以增选一台计算机用于震源的导航和显示存储震源

的重要数据。震源 GPS 选件由固定在编码器和震源上的 GPS 接收机、GPS 天线和接收校正信息系统组成。震源 GPS 选件能够记录震源的位置，而且提供在震源系统内部自动校准的高精密时钟。

编码器和箱体的所有操作参数（包括激发参数、控制参数、质量监视参数等）都可以通过遥控方式加载到每一台震源里。一些参数如扫描参数，在编码器和箱体方式中都要使用；另外一些参数如相位和力控制参数是特定环境下的操作参数，仅用于编码器或者箱体。

三、VE 系列电控系统

VE 系列可控震源控制系统是法国 Sercel 公司生产的，当前在产的是 VE464（图 1-3b），其早期的产品分别称为 VE416、VE432，这两种型号产品目前均已淘汰。VE 系列可控震源控制系统通常包括一个编码器和数个电控箱体以及相应加速度表和控制缆线等。其编码器全称为数字信号发生器（digital pilot generator，缩写为 DPG），施工时配置在数据采集系统上，完成可控震源和数据采集系统的同步控制与数据通信，并产生与记录在数据采集系统数据道的信号进行相关处理的真参考信号源；电控箱体全称为数字伺服控制器（digital servo driver，缩写为 DSD），配置在可控震源上，完成对可控震源输出信号的控制，并将控制结果传回到 DPG。VE464 系统是 Sercel 近几年推出的新一代采用全数字自适应伺服控制理论设计的可控震源控制系统。目前几乎可以实现所有先进的可控震源应用技术，如伪随机码扫描、多组激发源交替或滑动扫描、HPVA 扫描、编码扫描、分段扫描，可以与大多数卫星 DGPS 或 Glonass（原苏联的全球定位系统）接收机兼容，用于激发源的定位。



图 1-3 美国 ION 公司 VIB PRO 电控箱体 (a) 和法国 Sercel 公司 VE464 电控箱体 (b)

VE464 系统 DPG 有如下特点：DPG 通过以太网连接到数据采集系统并作为 VE464 系统的主控单元；DPG 完全与 Sercel 采集系统（428XL）集成，也可以连接到其他的使用其自身图形用户接口的采集系统；DPG 能够产生多至 32 种数字先导扫描信号，同时产生两种不同的模拟先导扫描信号。24 位的数字先导扫描信号使得信号的产生有更好的质量和更低的噪声。先导或者一个参考扫描是从操作员定义的 32 个基础信号库和高级参数结合而产生的；DPG 与配套的数据采集系统联机能够实现大规模高效滑动扫描生产。

VE464 系统数字伺服驱动器（DSD）安装于每一台震源车内，DSD 完成震源地面力的

实时控制，同时计算和传输完整的 QC 数据。提供的维护模式使震源性能和 GPS 系统检查非常容易；DSD 能够作为从属震源电控箱体去控制从属采集系统（此种情况下它不控制任何震源）。VE464 系统 DSD 可以和外部 Tablet PC 一起连接作为一个 QC 终端或者作为 GPS 导航选件的大屏幕监控器，Tablet PC 容易提供 DSD 编程、高效完成一台 DSD 伺服参数与另一台 DSD 伺服参数的比较。此外，Tablet PC 可使 DSD 之间使用 WiFi 网络连接，保证它们的设置有系统的配置参数。扩展 QC 数据可以实时发送到采集系统或者储存在 Tablet PC 或 USB 存储卡里，用于一些特殊的采集方法（如 HFVS）来进行分析和处理。这些数据包括基值地面力、参考信号、重锤加速度信号和平板加速度信号。根据施工方法、投入设备情况，VE464 可以采用不同的通信配置方案，一台 VE464 编码器可以控制多达 32 组震源。

第四节 相 关 器

可控震源相关器安装在仪器车上，主要功能是把野外采集的原始信号与编码器发来的真参考信号做互相关、叠加处理，从而得到通常意义的原始单炮记录。目前大多数仪器没有独立的相关器，通过软件实现相关、叠加处理。