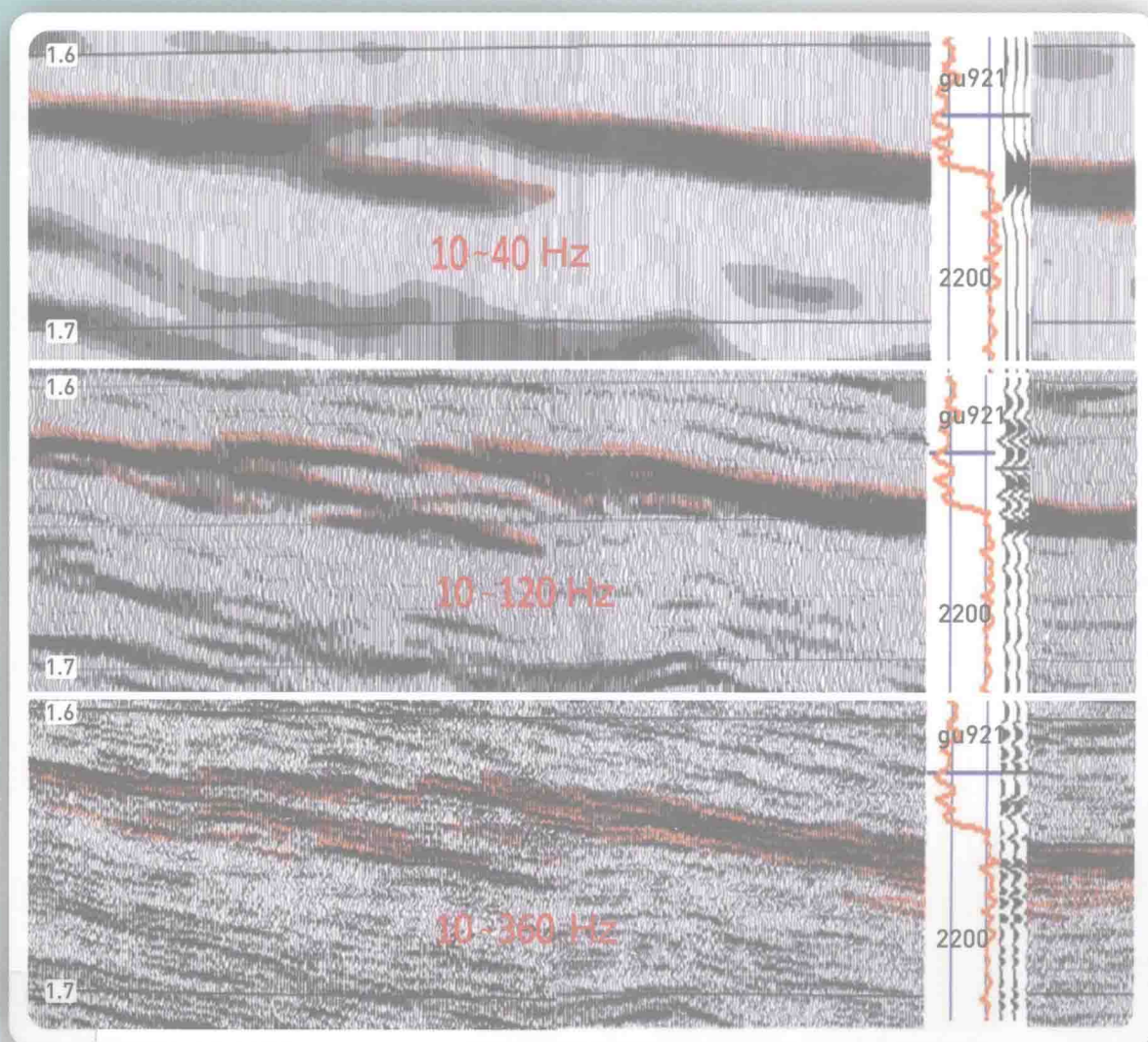


高分辨率地震勘探技术

——辽河大庆胜利塔里木油田及煤田实验应用

李 忠 著



中国石油大学出版社



高分辨率地震勘探技术

——辽河大庆胜利塔里木油田及煤田实验应用

李 忠 著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

高分辨率地震勘探技术: 辽河大庆胜利塔里木油田
及煤田实验应用 / 李忠著. — 东营: 中国石油大学出版社, 2013. 2

ISBN 978-7-5636-3927-4

I. ①高… II. ①李… III. ①高分辨率—地震勘探—
研究 IV. ①P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 040858 号

书 名: 高分辨率地震勘探技术——辽河大庆胜利塔里木油田及煤田实验应用
作 者: 李 忠

责任编辑: 王金丽(电话 0532 — 86981532)

封面设计: 青岛友一广告传媒有限公司

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@163.com

印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532 — 86981532, 0546 — 8392563)

开 本: 185 mm × 260 mm 印张: 8 字数: 139 千字

版 次: 2013 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 58.00 元

总是走直路，直路是自然的，相应地说和做一切符合健全理性的事情。
因为这样一个目标使一个人摆脱苦恼、战争及所有的诡计和炫耀。

——一个古罗马皇帝的人生思考
《沉思录》马可·奥勒留著

序言

高分辨率地震勘探技术是石油勘探技术的一项重要突破。近 20 年来在各油气勘探领域得到广泛运用,取得了许多可喜成果。河南油田高级工程师李忠先生从事地球物理勘探 50 余年,积累了丰富的经验,有较深的造诣。尤其在高分辨率地震技术野外施工、数据处理、解释技术和推广运用方面大胆探索、积极进取、孜孜不倦、呕心沥血的精神是难能可贵的。退休以后 10 余年仍然老骥伏枥深入研究、推广应用高分辨率地震勘探技术,在理论和实践方面又有新的认识和成果,他不遗余力撰写的本著作即将出版可喜可贺!

高分辨率地震勘探技术和其他科学技术一样要经历发现、发展、不断完善的过程。有理由相信本著作对于高分辨率地震勘探技术的进步、完善、推广将发挥积极的作用。李忠这种不断求索的精神也是一个地球物理勘探工作者值得称赞的品德。油气勘探需要高分辨率地震勘探技术的不断完善,更需要为之奋斗不息人士。

唐之祥 2012.8.26

前言

《高分辨率地震勘探技术》一书 1997 年出版前后,胜利油田、大庆油田、辽河油田、中原油田、冀东油田等单位先后开展了从采集阶段开始的高分辨率地震勘探试验研究工作。

2002 年后,与辽河油田物探研究所、大庆油田勘探开发研究院等单位合作,较全面系统地开展了高分辨率地震勘探的实验和应用工作,实验内容和地质效果较以前丰富了许多,将这些资料搜集起来编写了本著作。

2002 年 4 月初,在北京神州方圆油气技术服务有限公司工作期间,与西安石油仪器总厂四分厂合作,研制成功高灵敏度加速度检波器。

2003 年 5 月与辽河油田物探研究所合作开展高分辨率地震勘探与常规地震勘探的对比试验,是高灵敏度加速度检波器研制成功后的首次应用试验。

2005 年与新疆物探公司合作,在塔北地区进行了高灵敏度加速度检波器应用试验。

2008 年末至 2009 年初与大庆油田物探公司合作,开展高灵敏度加速度数字化检波器高密度采集的高分辨率地震勘探与常规地震勘探的对比试验。

2010 年 11 月开始,与大庆油田勘探开发研究院合作,对利用 DSU3 检波器采集的 LMD 地区的三维地震勘探资料开展了高分辨率处理和高分辨率解释的试验应用工作。

2012 年 7 月与大庆油田勘探开发研究院合作,在 Landmark 解释工作站利用 230~260 Hz 尖脉冲反射对比追踪,对 1~2 m 薄油层分布范围进行预测,其成果与开发地质成果图有很好的一致性。

速度型检波器单个接收的近似高分辨率采集的地震勘探项目也做了几项。

2005—2009 年间,与北京华昌新业物探技术服务公司合作期间,主持完成了山西石楼地区煤层气高密度高分辨率地震勘探。

完成了淮南煤矿单个检波器高密度采集三维地震资料的高分辨率处理。

完成了胜利油田军马场地区单个检波器高密度采集的高分辨率处理工作。

完成了大庆油田西部斜坡地区单个检波器高密度采集的高分辨率处理工作。

个人以为,这些珍贵的资料和具有突破性的技术成果应该总结以便提供同仁们参考。

本书将《高分辨率地震勘探技术》(1997年版)中的一些技术理念进行了修正,并在以下几个方面进行了较多论证和叙述。

(1) 技术原理简述方面,讨论了如何保护反射波时间域尖脉冲波的特征和频率域的频带宽度。

(2) 通过原始资料分析研究,系统地比较了常规方法采集和高分辨率采集对反射波的影响。修正了采集方法中突出强调压制低频信息作用的技术理念,更加显示了高灵敏度加速度检波器的作用。

(3) 修正和完善了高分辨率处理流程,放弃了一些处理方法的应用。

(4) 较多地展示了高分辨率尖脉冲反射波与多地区和多探井声速测井曲线的详细标定,显示出了高分辨率地震道对于分辨 1 m 以上厚度的地层的能力已逼近电测井声速曲线的可喜成果。

(5) 高分辨率地震勘探多频段剖面资料与油田多开发钻探井地质资料层位标定后的尖脉冲反射波的对比解释成果,被几百口开发钻井地质成果证明,高分辨率地震勘探可以承担 1 m 左右薄地层和 3 m 落差断层的精细勘探。

地震勘探在我国发展了 60 多年了,以前对它的纵向、横向分辨能力从来没有明确的要求,也没有操作规程明确规定。

1991 年 10 月,石油天然气总公司总地质师严敦实先生,在全国物探技术座谈会上,指示河南油田从事 3 年的高分辨率地震勘探试验研究,之后的实践可以说这是石油和煤炭地质勘探界值得纪念的事件。

高分辨率地震勘探技术于 1993 年 6 月问世以来,虽然于 1997 年获得了国家科技进步奖二等奖,当年又出版了《高分辨率地震勘探技术》一书,我国东部各大油田也相继开展推广应用试验。但是对它的较高的分辨能力的怀疑和不信任还是存在的,对于一些技术方法应用效果的争论时有发生。

人类发展到今天,对自然界认识的每一次进步常常有激烈的争论。争论是正常的,正当的争论能促使技术进步。只要正当地认真对待技术原理,坚持实验研究,实事求是地尊重实验成果,争论的问题会明朗的。在退休之后,不停顿的实验研究,此争论也是动力之一。将实验研究成果公布于众,也许会引起更广泛的争论。

怀疑和不信任,究其原因可能还有另外两方面:一是物探技术领导阶层受上述争论影响不敢相信高分辨率地震勘探技术。二是高分辨率地震勘探技术应用

的实际例证只局限于河南油田的情况,加之宣传的又少,可能没有机会使具有某些方法使用决定权的石油和煤炭的地质勘探家们详细了解它的分辨能力。

高分辨率地震勘探与常规地震勘探在技术原理方面并无多大的差别。它们的差别主要表现在应用技术的可操作层面,因此本书在技术原理方面只作一些简要叙述,而较多地叙述了高分辨率地震勘探与常规地震勘探实际资料的对比,以及高分辨率地震勘探资料与钻探地质成果资料的对比。

本书较多地展示了我国东部几个油田及塔里木地区高分辨率地震勘探实验资料。辽河油田和大庆油田的高分辨率地震勘探实验资料与多探井地质资料的层位标定,证明了它能分辨 $1\sim 2\text{ m}$ 的薄地层。尤其大庆油田 LMD 地区的 30 多口开发井的地质层位标定,更充分地说明高分辨率地震勘探的道记录分辨 1 m 厚度地层的能力已逼近电测井的声速测井曲线。

高分辨率地震勘探能够凭借着它极高的纵向分辨能力,促使横向分辨能力的提高(通常认为横向分辨能力大小要受菲涅尔带大小的约束),为查明小砂体的空间展布开辟了多、快、好、省的前景。

本书较多地列举实验和应用资料,是为了简单明了地宣传和介绍高分辨率地震勘探的分辨能力。并希望对高分辨率地震勘探持有怀疑的勘探家们,能从这些实际资料出发,全面了解高分辨率地震勘探技术。

本书也较多地展示了多地区石油和煤炭企业常规地震勘探资料经高分辨率处理技术处理的成果。高分辨率处理技术能把常规(老)资料的反射波从 $20\sim 30\text{ Hz}$ 提高到 $20\sim 120\text{ Hz}$,且反射波的能量均衡,使视主频有 $3\sim 5$ 倍提高。这为大量老资料提高 $3\sim 5$ 倍分辨能力提供了可靠的技术方法。

退休 13 年了,继续试验研究高分辨率地震勘探技术是我的爱好,也是退休生活中的一大乐趣。对于一个退休之人,如果没有多方面同仁的热心支持和帮助,这些新的实验研究成果的取得是不可能的。

如果本书对石油和煤炭勘探与开发工作有较大益处,请应用这一技术的同仁们和我一起记住并感谢那些对该项技术发展做过重要支持的人们吧!

感谢 1991—1998 年期间,前中国石油天然气总公司的部级领导和勘探局、科技局的领导对该项技术发展的大力支持。

感谢河南石油勘探局老局长唐光裕同志的大力支持。

感谢北京神州方圆油气技术服务有限公司任焱华先生对该技术发展的支持。

感谢北京合康科技发展有限公司薛维先生对该技术的喜爱和大力支持。

同时也要感谢:

辽河油田物探公司研究所

新疆克拉玛依物探公司

胜利油田物探公司

大庆油田物探公司

大庆油田勘探开发研究院等单位领导在高分辨率地震勘探实验应用方面给予的大力支持。

李忠

2012.9.1

目录

第 1 章	高分辨率地震勘探技术原理试验研究	1
1.1	地震勘探反射脉冲波时间域和频率域的性质	1
1.2	地震道内单个检波器接收有效防止人为伤害反射波	3
1.2.1	胜利油田军马场地区的试验	4
1.2.2	山西石楼地区煤层气勘探单个检波器采集	5
1.3	高灵敏度加速度检波器的研制	6
1.3.1	高灵敏度加速度检波器 SWJ-43 与速度型 20DX 检波器原始记录对比	7
1.3.2	高灵敏度加速度检波器 SWJ-43 与速度型 20DX 检波器原始记录频谱分析	9
1.4	高灵敏度加速度检波器在辽河油田的试验应用	10
1.4.1	视觉直接分析记录	12
1.4.2	频率振幅谱分析	12
1.4.3	时间域频率扫描分析	14
1.5	数字化检波器最大限度地防止高频损失	16
1.5.1	检波器有线传输和无线传输对反射波高频成分影响的试验	16
1.5.2	检波器有线传输和无线传输对反射波高频成分影响的频谱分析	17
1.6	不同类型加速度检波器的比较	18
1.7	关于横向分辨率	20
1.7.1	采集密度与空间假频	20
1.7.2	横向分辨能力	21
1.7.3	横向分辨率	22

第2章	大庆油田 QN 地区高分辨率地震和常规地震采集方法对比试验	24
2.1	采集工作设计	24
2.2	原始记录概况	25
2.3	原始记录频率振幅谱分析	26
2.4	原始记录频率扫描分析	27
第3章	地震勘探高分辨率处理技术	29
3.1	高分辨率处理技术特征	29
3.1.1	最大限度地拓宽反射波频带	30
3.1.2	零时差道组合	31
3.1.3	成果资料多频段显示	35
3.2	高分辨率处理技术应用实例	37
3.2.1	常规地震资料高分辨率处理实例	37
3.2.2	高分辨率采集资料的高分辨率处理	45
第4章	高分辨率地震勘探资料解释	66
4.1	层位标定	66
4.1.1	常规合成记录的制作和层位标定	66
4.1.2	高分辨率合成记录制作和层位标定	67
4.1.3	高分辨率资料和常规资料经高分辨率处理与相同声速合成记录的层位标定比较	77
4.1.4	常规采集和高分辨率采集薄地层反射波横向分辨能力比较	85
4.2	宽频带尖脉冲反射波的对比追踪	90
4.2.1	LMD 地区高分辨率三维资料高分辨率处理的基本情况	90
4.2.2	多频段地震剖面与多钻探井地质层位的标定	92
4.2.3	1 m 厚度薄砂层反射波的解释	94
4.2.4	3 m 断距的小断层解释	98
第5章	尖脉冲反射波的对比追踪成果与密集开发钻井地质成果的对比实验	103
5.1	实验区块选择及对比实验工作顺序	103
5.2	高分辨率合成记录制作及层位标定	104
5.3	T1-1 及 T1-2 尖脉冲反射波的对比追踪	106
5.3.1	T1-1 尖脉冲反射波的平面展布	107
5.3.2	T1-2 尖脉冲反射波的平面展布	108

5.4 T1-1 波和 T1-2 波平面分布与钻井地质成果的比较	109
5.5 T1-1 波和 T1-2 波空间分布的叠合	110
5.6 对比实验结论	111
结束语	112
参考文献	113

第 1 章

高分辨率地震勘探技术原理 试验研究

20 世纪 70 年代中后期发展起来的地震勘探数字化采集技术,很快地促进了原始资料的处理技术。三维地震勘探技术的发展使得反射波在反射界面上归位的精度有很大的提高。一直到 20 世纪末的这段时间,是我国地震勘探技术迅猛发展的时期。尤其是资料采集仪器硬设备和数据处理的硬、软设备的技术进步十分活跃。

1991 年石油天然气总公司立项的“高分辨率地震勘探试验研究”项目工作较快地取得了成绩。“高分辨率地震勘探试验研究”项目所取得的技术成果,在国内由上至下的推广工作,在 1998 年前后达到了高潮。

由于多方面的原因,高分辨率地震勘探的采集技术和数据处理技术并没有广泛地推广开来。

笔者是原项目负责人,退休后坚持与多方合作,进行更深入的试验研究。尤其与辽河油田物探公司、大庆油田物探公司、大庆勘探开发研究院的多次合作取得了丰硕成果。

高分辨率地震勘探技术研究有三个环节,原始资料采集方法的研究试验仍然是中心课题。反射波的性质、常规采集方法对它的伤害,以及如何更好地避免和补偿它在传播过程中的高频成分较快地损失,这些都是高分辨率地震勘探采集工作阶段首先要继续研究试验的内容。

1.1... 地震勘探反射脉冲波时间域和频率域的性质

重温反射波的特性很有必要,因为地震勘探家们在工作中常忘记了它。并且,只有较彻底地了解它才能识别反射波的“真”与“假”。(经常听到:这么高频率的波是真的吗?)坚持原理性质,审阅以下实验资料就可以较明了地判断常规采

集的 20~30 Hz 的波和高分辨率采集的 20~260 Hz 的波孰“真”孰“假”的问题。

时间域的特征:

反射波是由许多简谐(周期、正弦)波动的叠加合成的。周期正弦波表示为:

$$A\sin(2\pi ft + \varphi)$$

用它描述某一时间段($t_0 + T$)内某一个谐波,即有:

$$X(t_1) = A\sin(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (1-1)$$

在 $t_0 + T$ 时间段内若有很多(或无限多)个不同频率、不同振幅的谐波叠加而形成非周期波动 $x(t)$, 可用傅里叶级数描述它, 即:

$$X(t) = x(t_1) + x(t_2) + \cdots + x(t_{n+1}) \quad (1-2)$$

图 1-1 表示它的物理特性:

从简单的技术原理方面讲, 后面所列举多地区大量高分辨率实验资料将证明图 1-1 中 $X(t)$ 的 n 值越大, $X(t)$ 波越尖锐。

频率域的特征:

反射波信号分析的主要数学工具傅氏变换有一个重要定理, 可以称为展缩定理, 即如果有

$$X(t) \longleftrightarrow x(f) \quad (1-3)$$

就有

$$X(at) \longleftrightarrow (1/|a|)x(f/a) \quad (1-4)$$

其物理意义可用近似脉冲波的方波傅氏变换图 1-2 表示。

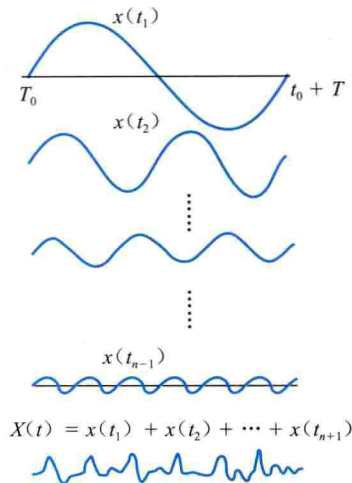


图 1-1 $x(t_1)$ 到 $x(t_{n+1})$ 个简谐波动的叠加示意图

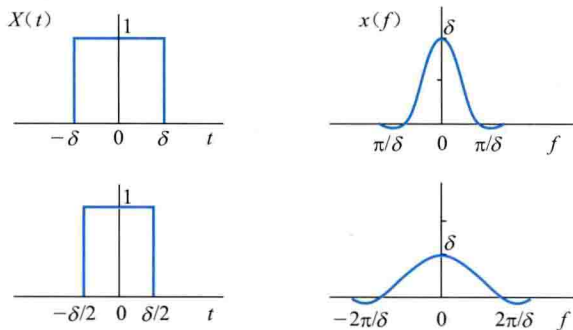


图 1-2 傅氏变换展缩定理图

结合式(1-3)、(1-4)对图 1-2 的分析如下:

$$\text{当 } a = 1 \quad \delta(t) = \begin{cases} 1 & |t| \leq \delta \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\text{当 } a = 2 \quad \delta(2t') = \begin{cases} 1 & |t'| \leq \delta/2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

在求证式(1-4)时曾令 $at = t'$, 所以有 $\delta = t = 2t'$, $t' = \delta/2$ 。

可以得出重要结论: 一个脉冲波动(尖锐地震反射波的近似), 当它在时间域缩小 a 倍时, 它在频率域就增宽 a 倍。

这里将列举的大量高分辨率地震勘探资料反复证明反射波是非周期脉冲波动, 是很多不同频率的正弦波的合成, 而且脉冲波越尖锐频带越宽。也可以简单说成: 频带越宽, 视主频越高(脉冲波越尖锐)。

在讨论高分辨率地震勘探技术问题时, 经常提到反射波的主频和频宽的问题, 其概念统一为好。单娜琳等 2006 年版《工程地震勘探》(第 35 页)叙述得较清楚:

地震波是非周期函数, 其振幅谱为连续谱。它表示一振幅谱的特征, 一般用主频和频带宽度(简称频宽)表示。 f_0 是主频, 即振幅曲线极大值对应的频率, 信号的能量大部分集中在主频附近; 以振幅谱曲线极大值 $A(f_0)$ 为 1, 对应于 $A(f_0) = 0.707$ 的两个(f_0 的左右)频率值 f_1 和 f_2 , 把 $\Delta f = f_2 - f_1$ 叫做频宽, f_1 和 f_2 的大小反映了脉冲信号的大部分能量集中在那些频率范围, Δf 的大小给出了这个范围的宽窄。

我们经常说的视主频是指 1 s 内同相轴的个数。

为什么常规地震勘探剖面成果上反射波视主频只要相当于图 1-1 中的 $x(t_2)$ 的水平呢(视主频 30 Hz)?

反射波在大地中传播时高频成分比低频成分损失快, 是人们认识到的主要原因。人们也认识到了人为的地震道内组合检波对高频成分有更大的损害。可是为了野外采集时监视记录的美观, 都不愿意放弃组合检波技术, 也不想把野外繁重的、十分有害的组合检波改为由室内数据处理时进行, 这是最主要的原因。

高分辨率地震勘探采集工作最主要的技术方法就是最大限度地拓宽反射波的频带。采集方法的反射波激发和接收技术在《高分辨率地震勘探技术》(1997 年版)中已列举了许多实验资料。

1.2... 地震道内单个检波器接收有效防止人为伤害反射波

反射波在传播过程中的自然衰减, 用现今的处理技术是可以作许多补偿的,

而组合检波对高频成分的伤害是不可逆转的。组合检波是高截滤波,在《高分辨率地震勘探技术》(1997年版)和许多教科书中已有论述。它对反射波的伤害程度有多大,通过实验给出了明确的答复。

1.2.1 胜利油田军马场地区的试验

图 1-3 是胜利油田军马场地区试验生产记录,是同一震源 10 m 内三种检波方式所采集记录的初至波的频谱分析。(其中 *a*, 单个动圈式检波器接收的能量特大的原因是 SI 仪器放大器系统二进制数码编码错误,美国籍制造人后来改正了。但它的相对值可以应用。)

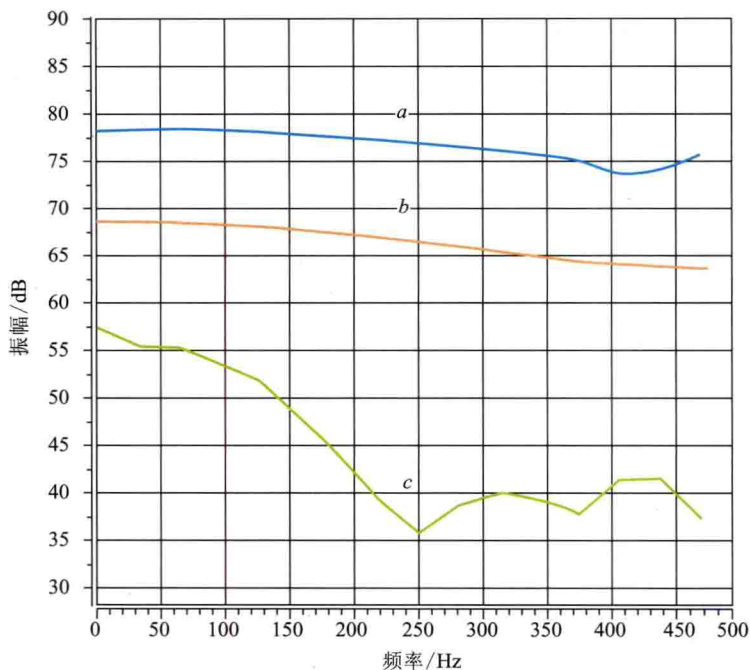


图 1-3 不同接收方式频谱图

a—单个动圈式检波器接收;*b*—MEMS 加速度三分量的 *z* 分量接收;*c*—20 个动圈式检波器组合接收

如果以振幅谱的振幅最大值的 0.707 范围内频率最低值和最高值计算它们的频带宽度,则分别是 *a*, 400 Hz; *b*, 400 Hz; *c*, 175 Hz。

采用 9 m 左右深度的井中潮湿砂泥地层内炸药激发,近震源 10 m 内接收,在我国东部的河南油田、辽河油田、大庆油田,测量到的脉冲波的频宽均达 400 Hz。

图 1-3 中的 *a* 和 *b* 频宽一致,说明脉冲波激发后 10 m 内几乎看不到衰减现象,

也看不出加速度检波器提升高频成分的效果。而 c 和 a, b 相差很大。在 250 Hz 频率时, c 和 b 竟差到 30 dB 以上。

当然由于炮检距和组合点基距相差太小,突出了组合检波的高截频效应。还需要列举较深地层反射波组合与单个接收的情况分析。

1.2.2 山西石楼地区煤层气勘探单个检波器采集

图 1-4 是山西石楼地区煤层气勘探生产记录。采集方法是由单个数字化检波器接收,机电传感器为动圈式的 20DX,道距 5 m,可谓高密度采集。用室内 11 道组合模拟野外 11 个检波器组合接收。见图 1-4 单个检波器和组合检波器记录与频谱比较图。

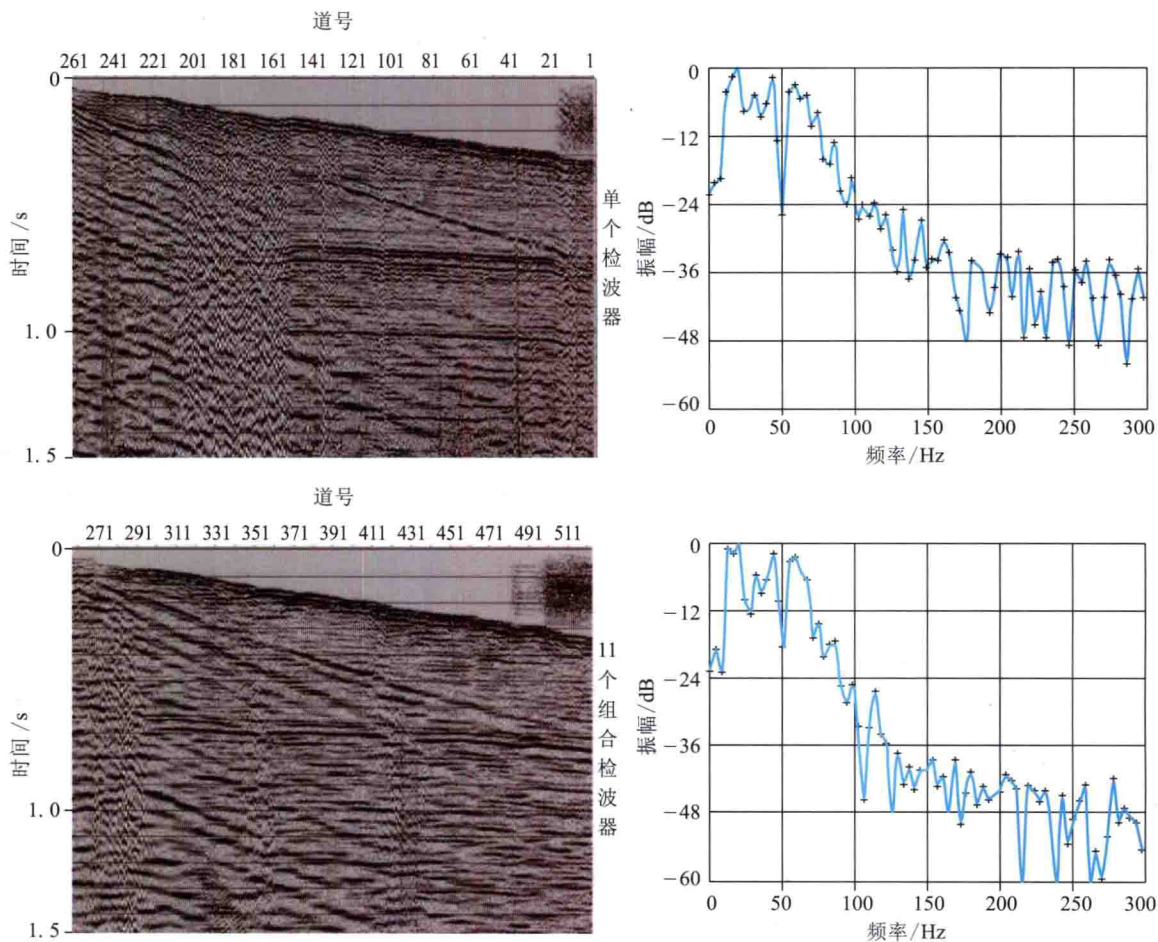


图 1-4 单个检波器和组合检波器记录与频谱比较图

图左侧的记录长度为 1.5 s,由 2 kg 炸药在 9 m 井中激发的;右侧是对应左侧记录的频谱。从对两个频谱 100 Hz 的相对差分析可以看出:单个检波器的是