

文章编号:1673-5005(2007)01-0040-05

声波测井相控线阵辐射器幅度加权的优化设计

孙志峰, 乔文孝, 车小花

(中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249)

摘要:对声波测井相控线阵声波辐射器进行了幅度加权的优化设计。分别针对辐射声束主瓣和旁瓣的最小化条件建立了相控线阵幅度加权的优化目标函数,采用拉格朗日乘子算法对目标函数进行非线性规划,并确定了最优幅度加权因子。通过数值计算对比分析了均匀幅度加权和不同幅度加权条件下相控线阵声波辐射器的指向性以及辐射声束角宽的差异。结果表明,优化设计可以很好地实现相控线阵辐射器旁瓣的最小化和给定旁瓣级条件下声束主瓣角宽的最窄控制,并且可以根据声波测井的不同要求提供相控线阵辐射器幅度加权的优化参数。

关键词:幅度加权;相控线阵辐射器;优化设计;声波测井

中图分类号:P 631.81

文献标识码:A

Optimization design of amplitude weighting for linear phased array transmitters in acoustic well logging

SUN Zhi-feng, QIAO Wen-xiao, CHE Xiao-hua

(School of Resource and Information Technology in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Optimization design of amplitude weighting for linear phased array acoustic transmitters in acoustic well logging was studied. Optimum weighting factors were determined by the method of augmented Lagrange algorithms. The optimum parameters in objective functions were searched for the case of minimization of main lobe width and side lobes respectively. Directivity and main lobe width were compared for the linear phased array acoustic transmitters with amplitude weighting and non-amplitude weighting using numerical examples. It is shown that the optimization design can make the side lobes minimize and the main lobe width narrow under a certain sound level of side lobes. The optimum method of amplitude weighting can be applied in acoustic well logging to provide appropriate parameters for the linear phased array acoustic transmitters in different cases.

Key words: amplitude weighting; linear phased array transmitters; optimization design; acoustic well logging

声波测井仪器中单极子声源发出的能量无明显的指向性,因而无法对其辐射的声场进行自动控制^[1,2],这会导致只有很少的一部分能量是向接收探头一侧辐射而形成有用信号,而大部分辐射能量将向与接收探头相反的方向辐射形成无用信号。采用这种声源的声波测井仪器的探测深度很浅,信噪比较低,只能用来对井壁附近的岩石特性进行测量,而不能应用于对远离井轴几米至几十米远的地质结构进行反射声波成像测量^[3]。在声波测井中使用相控线阵辐射器,通过改变相控线阵辐射器阵元个数、阵元间距和声源频率等参数,可以实现辐射声束偏

转和声束主瓣角宽的控制^[4],使辐射的声波具有指向性,明显改善辐射声场。理论和实验证明,在相控声波技术中,通过幅度加权可以改善辐射声束的角宽,进一步改善辐射声场^[4,5,9]。乔文孝等人^[2,6]对于相控线阵声波辐射器辐射声束角宽的幅度加权技术已经进行了理论和实验研究,初步证明幅度加权对于改善辐射声场具有明显的效果,不过仅仅涉及了可以用乘积原理求解的、相对简单的幅度加权问题,而未实现旁瓣的最小化和给定旁瓣级条件下波束宽度的最窄控制,还不能实现辐射器声束偏转和声束角宽的最优化控制。车小花等人^[6,8]对相控线

收稿日期:2006-08-19

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(10534040)和国家自然科学基金资助项目(40374049, 40574049)

作者简介:孙志峰(1979-),男(汉族),河北沧州人,硕士研究生,研究方向为声波勘探数值和物理模拟。

阵声波辐射器在充液井孔内、外产生的声场进行了数值模拟,也未涉及相控线阵的幅度加权优化问题。笔者采用非线性规划的方法对声波测井相控线阵辐射器幅度加权因子进行优化计算,分别研究旁瓣的最小化和给定旁瓣级下声束主瓣角宽最窄时的最佳加权因子,从而确定辐射器各个阵元的激励响应振幅。

1 相控线阵声波辐射器幅度加权的数学规划

对于相控线阵幅度加权的优化设计,已经发展了一些方法,如带入法、函数变换法、函数逼近法等^[9]。这几种方法都有各自特殊条件的限制,加上实际设计和使用时相控阵时,常常提出的技术指标比较特殊。如旁瓣限制在一个给定的开角内,主旁瓣比不小于某一值等。解决这类实际问题,用上述方法可能会遇到一定困难。而数学规划的方法就不受上述条件的限制,可以实现各种阵型复杂约束条件下的波束控制,得出最优加权因子^[10]。

1.1 点源相控线阵幅度加权的指向性函数

建立如图 1 所示的坐标系。由 N 个点声源构成的相控线阵辐射器的指向性函数为^[11]

$$D(\theta, \theta_0, x) = \frac{\left| \sum_{i=1}^N x_i \exp[-jk(i-1)d(\sin \theta - \sin \theta_0)] \right|}{\left| \sum_{i=1}^N x_i \right|} \quad (1)$$

式中, d 为阵元间距; k 为波数; θ 为空间单位向量与 z 轴的夹角; θ_0 为该相控线阵辐射主极大方向与 z 轴的夹角; x_i 为第 i 个阵元的振动幅度。

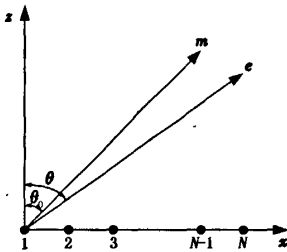


图 1 点声源相控线阵

由式(1)可以看出,阵元的振动幅度 x_i 对辐射声场的束宽和旁瓣均有影响。从定性的角度分析,若各阵元的幅度由阵的中心对称单调下降,则相控线阵的主波束变宽,旁瓣级降低;反之主波束变窄,旁瓣级升高^[12]。然而对于实际的相控线阵辐射器的设计,需要确定旁瓣最小化或给定旁瓣级条件下声束主瓣角宽最窄所对应的各阵元的振动幅度的具体数

值,因此用数学规划的方法进行最优化求解。

1.2 数学描述

N 个点声源相控线阵幅度加权的指向性函数由式(1)可化为

$$D(\theta, \theta_0, x) = \frac{|D_R + jD_I|}{\left| \sum_{i=1}^N x_i \right|} \quad (2)$$

其中

$$D_R = \sum_{i=1}^N x_i \cos[k(i-1)d(\sin \theta - \sin \theta_0)],$$

$$D_I = \sum_{i=1}^N x_i \sin[k(i-1)d(\sin \theta - \sin \theta_0)].$$

取振幅归一化即 $\sum_{i=1}^N x_i = 1$, 这样当偏转角度 $\theta = \theta_0$ 时, 保证指向性函数的值为 1。要使旁瓣幅值最小, 就是在旁瓣范围以内使旁瓣幅值

$$M(x) = \max_{\theta_{k0} \leq \theta \leq \theta_k} D(\theta, x) \quad (3)$$

尽可能小。也就是求解一组非负的归一化的向量 $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0)$, 使旁瓣 $M(x^0)$ 小于任何其他响应 x 所产生的旁瓣 $M(x)$, 即

$$M(x^0) = \min_{\substack{\sum_{i=1}^N x_i = 1 \\ x_i \geq 0}} \max_{\theta_{k0} \leq \theta \leq \theta_k} D(\theta, x). \quad (4)$$

式中, θ_{k0} 和 θ_k 表示旁瓣所在的范围。

1.3 非线性规划

将 θ 离散化, 在 $\theta_{k0} \leq \theta \leq \theta_k$ 范围内的取值点为 $\theta = \theta_l, l = 1, 2, 3, \dots, L$ 。

L 应该取的足够大以保证各个角度的方向性响应。

由式(2)和(4), 令

$$M = \min_{\substack{\sum_{i=1}^N x_i = 1 \\ x_i \geq 0}} \max_{1 \leq l \leq L} [D_R^2(\theta_l, x) + D_I^2(\theta_l, x)]^{1/2}, \quad (5)$$

为了将式(5)化为非线性规划的形式, 引入新的变量 y , 使其满足不等式

$$y \geq \max_{1 \leq l \leq L} D(\theta_l, x)^2, \quad (6)$$

又因为在数学规划中, 常用作不等式约束条件, 这样引入松弛变量后, 确定基本解比较方便, 式(5)中的

等式改为不等式 $\sum_{i=1}^N x_i \geq 1$ 。

由此构造旁瓣最小化的目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min y \\ y - D_R^2(\theta_l, x) - D_I^2(\theta_l, x) \geq 0, \\ l = 1, 2, \dots, L; \\ \sum_{i=1}^N x_i - 1 \geq 0; \\ x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N+1. \end{cases} \quad (7)$$

求得使 y 最小的 $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ 就是所要找的最佳激励响应, y 代表最佳线阵指向性图旁瓣的平方值。

同样,若求辐射声束主瓣角宽的最小值,就要根据具体的技术指标对旁瓣级控制,使最大旁瓣级不超过给定的技术指标的条件下,主瓣角宽尽可能小,从而得到最优的激励振幅响应。设最大旁瓣幅值的平方为 A_{pb} ,主瓣的范围为 $\theta_0 \leq \theta \leq \theta_l$,将 θ 离散化,在 $\theta_0 \leq \theta \leq \theta_l$ 范围内的取值点为

$$\theta = \theta_s, s = 1, 2, 3, \dots, S,$$

则主瓣最小化的目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min y \\ y - D_R^2(\theta_s, x) - D_l^2(\theta_s, x) \geq 0, \\ s = 1, 2, \dots, S; \\ A_{pb} - D_R^2(\theta_l, x) - D_l^2(\theta_l, x) \geq 0, \\ l = 1, 2, \dots, L; \\ \sum_{i=1}^N x_i - 1 \geq 0; \\ x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N + 1. \end{cases} \quad (8)$$

1.4 非线性规划算法

对于非线性规划问题传统的优化算法主要有罚函数法和拉格朗日乘子法,而拉格朗日乘子法^[13-14]是在一般罚函数基础上建立起来的,它通过引入拉格朗日乘子,成功地克服了罚函数法的病态性质等缺点,具有较好的收敛速度和数值稳定性,是求解约束优化问题的主要且有效的算法。

为求解式(7)和式(8),首先要构造增广拉格朗日函数,把带约束条件的优化问题转化为无约束条件的优化问题。对于解决无约束条件的优化问题,又采用了拟牛顿(DEP)算法、一维搜索法、黄金分割法等。

由式(7)得出相控线阵辐射器旁瓣最小化的增广拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} M(x, \lambda) = & y + \frac{1}{2\rho} \sum_{j=1}^l \{ [\max(0, \lambda_j - \rho(y - D_R^2(\theta_j, x) - D_l^2(\theta_j, x)))^2 - \lambda_j^2] + \\ & \frac{1}{2\rho} \sum_{i=1}^N \{ [\max(0, \lambda_{l+i} - \rho(\sum_{i=1}^N x_i - 1))]^2 - \lambda_{l+i}^2 \} + \\ & \frac{1}{2\rho} \sum_{j=1}^{N+1} \{ [\max(0, \lambda_{j+l+1} - \rho x_j)]^2 - \lambda_{j+l+1}^2 \}. \end{aligned} \quad (9)$$

式中, λ 为拉格朗日乘子,是一个 $l + N + 2$ 维向量; ρ 为罚因子,可取 5 或 10。

拉格朗日乘子的修正公式为

$$\begin{cases} \lambda_j^{k+1} = \max[0, \lambda_j^k - \rho(y - D_R^2(\theta_j, x^k) - D_l^2(\theta_j, x^k))] ; j = 1, 2, \dots, l; \\ \lambda_{l+i}^{k+1} = \max[0, \lambda_{l+i}^k - \rho(\sum_{i=1}^N x_i^k - 1)] ; \\ \lambda_{j+l+1}^{k+1} = \max(0, \lambda_{j+l+1}^k - \rho x_j^k) ; j = 1, 2, \dots, N + 1. \end{cases} \quad (10)$$

计算的停止准则为

$$\begin{aligned} \phi(x^k) = & \sum_{j=1}^l [\max(- (y - D_R^2(\theta_j, x^k) - D_l^2(\theta_j, x^k)), \\ & - \frac{\lambda_j^k}{\rho})]^2 + [\max(- (\sum_{i=1}^N x_i^k - 1), - \frac{\lambda_{l+1}^k}{\rho})]^2 + \\ & \sum_{j=1}^{N+1} [\max(- \rho x_j^k, - \frac{\lambda_{j+l+1}^k}{\rho})]^2. \end{aligned} \quad (11)$$

当 $\phi(x^k) < \varepsilon$ 时,停止运算, x^k 即为最优解。若 $\phi(x^k) \geq \varepsilon$,且 $\phi(x^k) \leq \gamma \phi(x^{k-1})$,则由式(10)对拉格朗日乘子进行修正;否则 $\rho = \alpha \rho$,再对拉格朗日乘子进行修正。式中的 γ 为比例系数,可取 $\gamma = 0.5 \sim 0.8$, α 为罚因子的扩大倍数,可取 2。同理,由式(8)可以构造相控线阵辐射器主瓣角宽最小化的增广拉格朗日函数、拉格朗日乘子的修正公式以及计算的停止准则。相控线阵辐射器主瓣最小化和旁瓣最小化的程序流程示于图 2。

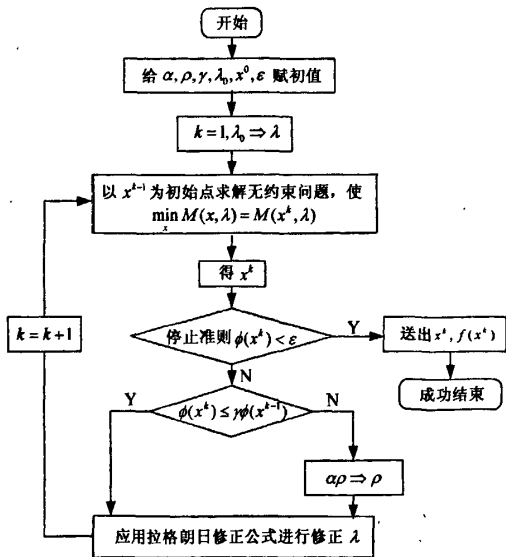


图 2 相控线阵辐射器主瓣最小化和旁瓣最小化的程序流程

2 数值计算结果分析

为了使设计的声波辐射器能够满足井下工作的

要求,在数值计算中取相控线阵声波辐射器的阵元个数为 6,阵元间距为 0.05 m,并取声波的频率为 12 kHz,声波的传播速度为 1 550 m/s。按非线性规划算法对相控线阵声波辐射器的辐射特性进行最优化计算,表 1 是对相控线阵进行旁瓣最小化和主瓣角宽最

小化(规定最大旁瓣级不超过 - 7.96 dB) 归一化后得到的最佳加权因子。可以看出,旁瓣最小化的幅度加权因子由阵中心单调下降,而控制旁瓣级条件下主瓣角宽最小化的幅度加权因子,中心阵元的加权因子幅值较小,两边阵元的加权因子幅值较大。

表 1 主瓣偏转角为 0° 和 30° 不同加权方式的加权因子对比

加权方式	各阵元的幅度加权因子											
	0°						30°					
主瓣最小	1	0.432	0.498	0.498	0.432	1	1	0.459	0.502	0.502	0.459	1
均匀加权	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
旁瓣最小	0.138	0.552	1	1	0.552	0.138	0.111	0.517	1	1	0.521	0.112

图 3 是根据表 1 中的幅度加权因子计算出的相控线阵辐射器二维指向性图。由图 3 可见,若采用幅度加权使相控线阵辐射器旁瓣最小化,相控线阵辐射器辐射声束的旁瓣级已经控制得很小,同时主瓣角宽达到了最大值。这就增大了主瓣的能量,使声波集中向确定方向传播。若采用幅度加权使相控线阵辐射器主瓣最小化(规定最大旁瓣级不超过 - 7.96 dB),相控线阵辐射器辐射声束的主瓣角宽相对减

小了,但是旁瓣级相应地增大了,而且主瓣角宽越窄,旁瓣级就越大。而旁瓣级的增大意味着声波能量的辐射范围变大,这对高空间分辨率的测量是不利的。作为比较,图 3 中也绘出了采用均匀幅度加权的相控线阵辐射器的辐射指向性图。可见,采用均匀幅度加权的相控线阵辐射器的辐射声束主瓣角宽和旁瓣级介于以上讨论的两种情况之间,说明幅度加权是有效果的。

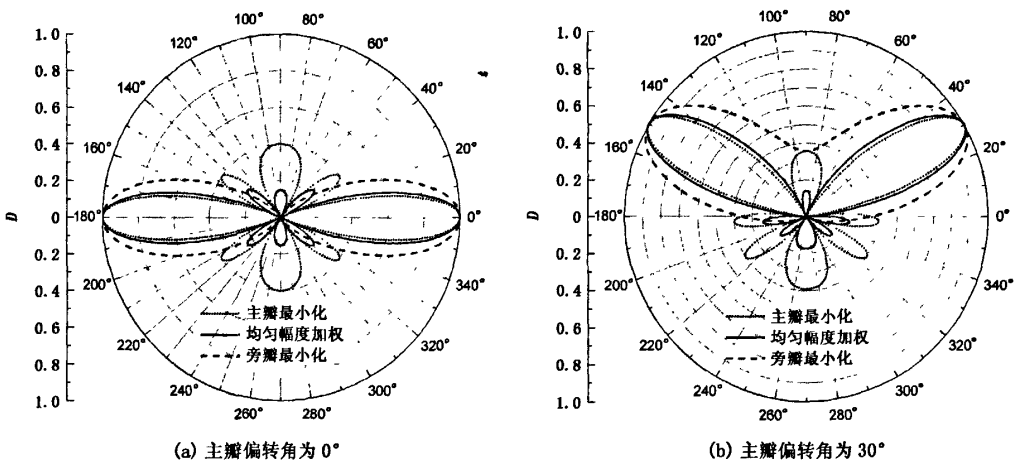


图 3 相控线阵声波辐射器的二维指向性图

表 2 是由幅度加权而改变的相控线阵辐射器的辐射声束 3 dB 角宽情况。由表 2 可见,相控线阵辐射主瓣的偏转角分别为 0° 和 30° 时,采用幅度加权使旁瓣的最小化时的 3 dB 角宽比均匀幅度加权分别增大 11° 和 15.1°。辐射器采用幅度加权技术,可以

比均匀幅度加权使用更少的阵元个数就能达到均匀幅度加权的 3 dB 角宽,从而降低了相控线阵辐射器控制通道制作的复杂性。若规定最大旁瓣级不超过 - 7.96 dB,采用幅度加权使主瓣最小化时的 3 dB 角宽比均匀幅度加权分别减小 2.8° 和 3.4°。

表 2 幅度加权对相控线阵辐射主瓣角宽的影响

加权方式	相控线阵主瓣偏转角为 0°			相控线阵主瓣偏转角为 30°		
	$\theta_1/(^{\circ})$	$\theta_2/(^{\circ})$	$\Delta\theta_{3\text{ dB}}/(^{\circ})$	$\theta_1/(^{\circ})$	$\theta_2/(^{\circ})$	$\Delta\theta_{3\text{ dB}}/(^{\circ})$
主瓣最小	- 9.7	9.7	19.4	19.4	42.0	22.6
均匀加权	- 11.1	11.1	22.2	17.9	43.9	26.0
旁瓣最小	- 16.6	16.6	33.2	11.7	52.8	41.1

3 结 论

(1) 根据相控线阵指向性函数的一般表达式,建立了相控线阵声波辐射指向性的幅度加权数学规划模型,采用拉格朗日算法对其进行非线性规划,分别得出旁瓣最小化和给定旁瓣级下波束角宽最窄时的最优加权因子。采用非线性规划方法求得相控线阵辐射器幅度加权因子,可以实现对波束主瓣角宽的最优控制。

(2) 与均匀幅度加权相比,采用幅度加权设计可以使旁瓣最小化,主瓣角宽相应明显增大;在规定最大旁瓣级下,采用幅度加权设计也可以使主瓣角宽最窄。主瓣最小化和旁瓣最小化不可兼得,需要根据具体情况进行取舍。

(3) 对相控线阵进行幅度加权既可以使辐射声束的角宽达到最小值,又可以使辐射声束的旁瓣取得最小值,不同的设计方案可满足相控声波测井的不同要求。

(4) 该优化方法也适用于其他类型相控线阵的幅度加权设计。

参考文献:

- [1] QIAO W X, DU G S, CHEN X L. Feasibility of application of linear phased array acoustic transmitters to acoustic well-logging[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(5):755-763.
- [2] QIAO W X, CHEN X L, DU G S, et al. Laboratory simulation on acoustic well-logging with phased array transmitter[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2003, 22(4): 33-38.
- [3] 车小花, 乔文孝. 充液井孔中的相控线阵声波辐射器在地层中产生的声场[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4):731-736.
CHE Xiao-hua, QIAO Wen-xiao, The acoustic field in formation generated by linear phased array transmitter in fluid-filled borehole[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(4):731-736.
- [4] 陈雪莲, 乔文孝, 孙建孟, 等. 相控线阵声波测井辐射器指向性影响因素研究[J]. 测井技术, 2004, 28(4): 277-280.
CHEN Xue-lian, QIAO Wen-xiao, SUN Jian-meng, et al. On influencing factors of the directivity of phased array transmitter in acoustic log[J]. Well Logging Technology, 2004, 28(4): 277-280.
- [5] 胡婷婷, 乔文孝, 陈雪莲. 声波测井相控线阵辐射器幅度加权的实验研究[J]. 测井技术, 2004, 28(6):511-566.
HU Ting-ting, QIAO Wen-xiao, CHEN Xue-lian. On experiment of amplitude weighting of the linear phased array used in acoustic logging[J]. Well Logging Technology, 2004, 28(6):511-566.
- [6] CHE X H, ZHANG H L, QIAO W X, et al. Numerical study on scanning radiation acoustic field in formations generated from a borehole [J]. Science in China Ser G, 2005, 48(2):247-256.
- [7] 车小花, 乔文孝, 闫相桢. 相控线阵声波辐射技术在反射声波测井中的应用探讨[J]. 测井技术, 2004, 28(2):108-111.
CHE Xiao-hua, QIAO Wen-xiao, YAN Xiang-zhen. The effectivity of applying linear phased array transmitter in borehole acoustic reflection logging [J]. Well Logging Technology, 2004, 28(2):108-111.
- [8] 车小花, 乔文孝, 闫相桢. 反射声波测井的有限元模拟[J]. 应用声学, 2004, 23(6):1-4.
CHE Xiao-hua, QIAO Wen-xiao, YAN Xiang-zhen. Numerical simulation of borehole acoustic reflection imaging using the finite element method [J]. Applied Acoustics, 2004, 23(6):1-4.
- [9] 李贵斌. 声纳基阵设计原理[M]. 北京:海洋出版社, 1993.
- [10] 滕振寰, 黄禄平. 用数学规划方法设计最佳基阵[J]. 高等学校计算数学学报, 1979:31-39.
TENG Zhen-huan, HUANG Lu-ping. The design of optimum phased array in mathematical programming way [J]. Numerical Mathematics Journal of Chinese Universities, 1979:31-39.
- [11] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京:北京大学出版社, 1990.
- [12] 王玉泉. 水声设备[M]. 北京:国防工业出版社, 1985.
- [13] 万仲平, 费浦生. 优化理论与方法[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2004.
- [14] 卢名高, 刘庆吉. 最优化应用技术[M]. 北京:石油工业出版社, 1997.

(编辑 刘为清)