

五、结 语

我们从上述的理想化模型所分析的冷却三个阶段可以看出:要想改变钢的性质,在激冷淬火过程中得到低碳马氏体组织(没有残留的奥氏体),必须设法缩短气膜冷却阶段,而且愈快愈好,这样能使钢试件很快地处于激冷的沸腾冷却阶段,提高淬火钢试件内的 $\gamma-\alpha$ 转变的同时性。第二阶段要冷却强烈些,使钢试件在650—550℃的温度区域内能够高速冷却,提高钢试件在马氏体转变温度范围内的冷却均匀性。第三阶段的开始温度要求高一点,以利于减少钢试件的变形和防止开裂。实际上,在我们所作的实验中正可看出:钢试件淬火时,淬火介质在超声场的作用下,第一阶段所形成的高温气膜很快地被破坏,这样一来,大大加快了试件的冷却速度(超过其临界冷却速度),并使最大的冷却速度朝着较高温度方向移动。

超声场为何能实现这些作用的机理,还需进一步探索。定性地说,超声波在淬火液中的空化效应可产生激烈的水击作用,足以使钢试件初期表面形成的蒸汽膜,在极短的时间内被破坏掉,使钢试件冷却完全处于激冷的汽泡沸腾冷却状态。而超声的振荡作用既有利于晶粒的细化,还有利于减小钢试件内部和表面的温差,从而使材料的性能有所提高,而且不致出现微裂纹。

超声场作为一种物理场,它在低碳钢激冷淬火实验中已经证明对冷却介质起着积极的作用,突出的是改善了激冷过程中淬火介质与淬火试件之间的热交换条件,从而提高了钢试件的冷却速度和冷却过程的均匀性。

我们研究的低碳钢激冷淬火过程中的超声场效应,已经具有重要的经济效益,因为低碳钢的价格较低,工艺性能良好,超声场激冷淬火时耗电量极少,工艺操作又简便,特别是激冷淬火后可自身回火,不需要再另行回火,性能即达到要求。由此可见,它既可以节约能量,又可以节约淬火回火的工艺时间。因此,可以说,用低碳钢能代替高质量而价格昂贵的钢材,这样一来,就能大幅度地降低机器制造的材料和工艺的成本,对实现四化目标有着重要的经济意义。

参 考 文 献

- [1] A. Crawford, Ultrasonic Engineering, London, 1955, 207—217.
- [2] M. J. Roberts, Met. Trans., 1970, 3287.
- [3] L. L. Beranek, Acoustics, McGraw-Hill Book Company, 1954, 540—711.
- [4] 大连工学院,《金属学及金属热处理》教材,1979.

用动态规划方法综合不等距线阵

兰 军

(中国科学院声学研究所)

1985年5月21日收到

动态规划方法是综合不等距阵的一个有效方法,但当阵元数比较多时计算量比较大。本文通过对阵元位置进行限制,避免过多的重复计算,使运算量大幅度减少。此外提出了重复迭代方法,可使旁瓣级进一步降低。

一、引 言

不等距阵是雷达和声呐设备中一种重要类

型的基阵。已经提出很多种不等距阵的综合方法,例如,按某种原则把幅度束控系数等效成阵元密度的方法^[1],微扰法^[2]等。这些方法仅当

阵元排得比较密才比较有效。本文作者提出过基于约束条件下的能量极值原理的逐步逼近法^[3],在原则上可以得到最佳的不等距阵,即旁瓣级最低的阵,但当平均间距接近或超过一个波长时会出现多个极值。解决的办法是需要找一组比较好的阵元距离做为初值。动态规划方法是一种有效的方法^[4],该方法实质上是一种简化了的列举法。但当阵元数目比较多时,计算量仍比较大,因而限制了它的应用。本文通过对各阵元位置做进一步限制可以大幅度减少运算次数。

二、综合方法

为讨论方便,假设阵是由 $2M + 1$ 个均匀振幅分布的阵元对称布设的线阵,指向性函数可写为

$$p(x, u) = 1 + 2 \sum_{i=1}^M \cos(2\pi x'_i u) \quad (1)$$

其中 x 代表一组阵元距离, x'_i 是第 i 个阵元相对阵中心即中心阵元的距离,以波长为单位。 $u = \sin \alpha - \sin \alpha_0$, α 是声场方向和阵法线的夹角, α_0 是扫描角。设各阵元的位置只能取一些间断值,为某个最小值 Δ 的整数倍, Δ 称为最小量化单位,以波长为单位,则 x'_i 可以写为 $x_i \Delta$, x_i 是量化数,取整数。

动态规划程序可以描写如下。第二个阵元可以放在 m_2 个可能的位置中的任何一个上。对每一个 x_2 , 设 x_1 可以取 m_1 个可能的位置,因而可以计算出 m_1 个指向性函数。在计算指向性函数时, x_3 直到 x_M 的值可以取相应的等距阵的值。旁瓣区应从第一个零点算起,它的位置应近似与等距阵的相同,为 λ/L , L 为阵长,则 $u_{\min} \approx \lambda/L - \sin \alpha_0$ 。找出 m_1 个指向性函数中旁瓣级最低的一个,记下相应的 x_1 值,将其余的 x_1 舍掉。这样, x_2 每取一个值就有唯一的 x_1 与之对应。下一步考虑第三个阵元位置,它可以取 m_3 个值,对每一个 x_3 , x_2 可以取 m_2 个值,对每个 x_2 则仅有一个 x_1 与之对应,因此可以计算出 m_2 个指向性函数,从中找出旁瓣级最

低的一个及其相应的 x_2 , 舍掉其余的 x_2 。这样 x_3 每取一个值只有唯一的 x_2 和 x_1 与之对应,这个过程一直继续到 x_{M-1} 。因为总阵长 L 固定, x_M 是固定的。最后, x_{M-1} 可取 m_{M-1} 个位置, x_{M-1} 每取一个值有唯一的 x_{M-2} , x_{M-3}, \dots, x_1 与之对应,因此共有 m_{M-1} 组阵元距离,可以计算出 m_{M-1} 个指向性函数。再比较它们的旁瓣级,旁瓣级最低的一组阵元距离就是最后选定的值。如果尚需对最小阵元间距进行限制,使它不小于某个值,比如说半波长,则对一组指向性函数进行比较时,应在阵元间距大于半波长的前提下再比较旁瓣级。

从上面的计算过程可以看出,这种算法隐含一个假定,即 x_{i-1} 的最佳位置仅仅由 x_i 确定,而没有考虑 x_q , $q > i$ 。实际情况自然不是如此,因此该方法在理论上说并不是最佳的,但是我们看到,该方法确实是合理的。设前 i 个阵元的一种组合可以给出较低的旁瓣级,这时 $x_{i+1} = x_{i+1}^0$ 。然后保持前 i 个阵元的组合,改变 x_{i+1} , 它可以取 m_{i+1} 个值,其中最好的一种组合给出的旁瓣级一定低于至少等于原来的旁瓣级,因为 x_{i+1} 的 m_{i+1} 个值中包括 x_{i+1}^0 。如果继续改变 x_{i+2} 的值,会得到更好的结果。由此看来,随着考虑的阵元的后移,前面任何一个好的结果都不断得到保持和扩大,一直到最后,在所有已计算过的结果中选出最好的结果。

我们可以使用下面的重复迭代方法克服或补偿上述程序的缺点:将最后计算出的阵元距离代替原来的等距分布做为初始值,再按上述方法重新计算一次或反复计算多次。如果前一次计算中,前 i 个阵元距离的一种组合曾被舍弃,它与新的后面阵元距离相组合能得出好的结果,仍会被重新拾取回来。这样 x_{i-1} 的最佳位置就不仅仅由 x_i 决定也与后面的阵元位置有关。

下面讨论各个阵元可能取的位置问题,它与运算次数关系极大。这个问题在文献[4]没有很好地解决。设 x_0 为阵的平均间距, $x_0 = N'\Delta$, 则半阵长的总量化数为 MN' 。原则上任一阵元都可以取 MN' 个位置。这样,对于全

部列举法需计算 $(MN')^{M-1}$ 个指向性函数才能得出最后的阵元分布。对上述的动态规划程序需计算 $(MN')^2(M-1) \approx M^3N'^2$ 个指向性函数,当阵元数比较多时,计算量仍然比较大。仔细分析可以发现上面的很多计算是重复的。例如 $x_i = x_i^0$ 和 $x_{i+1} = x_{i+1}^0$ 的组合与 $x_i = x_{i+1}^0$ 和 $x_{i+1} = x_i^0$ 的组合将给出相同的指向性函数。为此可对各阵元位置做如下限制: 1. x_i 只在 ix_0 附近变化,取 m_i 个可能的值,并且对 $j > i$ 有 $x_j > x_i$ 。2. 大量的计算表明,阵元间距平均说来是从阵中心向外越来越大,因而序数大的阵元位置偏离其相应的等距阵的位置越多,取的可能位置也应该越多。在本文编制的程序中,第一个阵元取的位置最多为 N' ,也可以少些。取该数目做为参数,然后序数每增加一个,该阵元取的可能位置就增加一个,其可能位置中的最大值与相应的等距阵的位置相同。当 $\Delta \geq 0.4\lambda$ 时,按照上述规律,阵元序数大的阵元位置就将偏离相应的等距阵位置太远,因此改为,阵元序数每增加两个其可能位置增加一个。这样 x_i 的可能位置是从 Δ 到 x_0 或更小些, x_i 的可能取值数目是 $N' + \text{Fix}(i/\varepsilon)$, 取值范围是从 $ix_0 - x_0 - \text{Fix}(i/\varepsilon)\Delta + \Delta$ 到 $ix_0 - x_0 + N'\Delta$, 其中“Fix”表示取整,

$$\varepsilon = \begin{cases} 2 & \text{当 } \Delta \geq 0.4\lambda \\ 1 & \text{当 } \Delta < 0.4\lambda \end{cases}$$

按照上面的关系式, x_i 的最小值可能小于 x_{i-1} 的最大值,这样就使各阵元的次序发生颠倒,与上面的限定不符,因此应该舍弃 x_{i-1} 大于 x_i 的那些值,这很容易在程序中解决。

通过对各阵元位置的限制,舍弃了重复的计算,使计算量大幅度减少。例如计算一个平均间距为 2λ 的 25 元线阵,取 $\Delta = 0.5$, $N' = 3$, 按文献 [4] 的程序需计算 10^4 个以上的指向性函数,而这里只需计算 400 个左右指向性函数,计算结果基本不受影响。

三、其它运算技巧

1. 在每次计算指向性函数时,我们只关心各旁瓣的高度,不管它们的位置,因此正象公式

(1) 那样,用变量 $u = \sin \alpha - \sin \alpha_0$ 代替 α , 这样可使运算量减少很多。

2. 从公式 (1) 如果将 u 量化后,其最大量化数为 J_0 , 而每计算一个指向性函数要计算 MJ_0 个余弦函数 $\cos(2\pi x'_i u)$, 这将使运算量变得很大。我们可以事先将所有独立的余弦函数计算出来,存在一个一维数组中。在计算指向性函数时,只需调用该值和做些简单的加法,而且利用余弦函数的周期性可以将独立的余弦函数的个数减少到最低限度。令 $u = \Delta u \cdot j$, Δu 是 u 的最小量化单位,它可以由抽样定理确定,它的最大允许值为 $\Delta u_{\max} = \lambda/(2L)^{[4]}$ 。于是 (1) 式可以改写为

$$p_i = 1 + 2 \sum_{j=1}^M \cos(2\pi \Delta \cdot x_i \cdot \Delta u \cdot j) \quad (2)$$

记 $\Delta \cdot \Delta u = B$, 则有

$$p_i = 1 + 2 \sum_{j=1}^M \cos(2\pi B x_{ij}) \quad (3)$$

如果事先计算出一维数组 $C(I_0)$

$$C(I) = 2 \cos(2\pi BI), \quad I = 0, 1, 2, \dots, I_0$$

其中 $I_0 = \text{Fix}(1/B)$ 表示独立的余弦函数个数,对任意的 i 和 j 如令

$$B_{ij} = x_{ij} - I_0 \text{Fix}(x_{ij}/I_0)$$

则有

$$p_i = 1 + \sum_{j=1}^M C(B_{ij}) \quad (4)$$

这样,独立的余弦函数个数,即 C 数组的元数被最大限度降低。

3. 当我们固定第 $k+1$ 个阵元位置,改变 x_k (序数小于 k 的阵元位置也要相应变化) 以便找出其最佳位置时, $x_q (q > k)$ 始终保持不变,因此无需每次都计算这部分阵元对指向性的贡献,在 x_k 取第一个位置时计算一次就可以了。我们把 p_i 重新写为

$$\begin{aligned} p_i &= 1 + \sum_{i=1}^k C(B_{ii}) + \sum_{i=k+1}^M C(B_{ii}) \\ &= 1 + \sum_{i=1}^k C(B_{ii}) + p_0 \end{aligned} \quad (5)$$

通过上述方法就可以使计算量降低到相当程度。

四、计算和讨论

对各种阵元数 N 和阵长 L 所计算出的最高旁瓣高度被列在表1中,其中

$$H = \sqrt{x_0/N},$$

是旁瓣所能达到的最低值的上限估值^[5], H_r 是按随机阵的估值^[1].

表1 计算结果

N	x_0/λ	最小量化单位	旁瓣高度	H	H_r
9	2.5	0.5	0.552	0.527	0.908
11	1	0.25	0.283	0.302	0.791
11	2	0.25	0.408	0.426	0.824
11	2.5	0.5	0.515	0.477	0.835
11	2.5	0.25	0.446	0.477	0.835
13	1	0.25	0.296	0.277	0.736
13	1	0.125	0.241	0.277	0.736
15	2	0.5	0.412	0.365	0.720
15	2	0.25	0.365	0.365	0.720
19	2	0.25	0.308	0.324	0.646
25	2	0.5	0.363	0.283	0.575
25	2	0.25	0.263	0.283	0.575

从表1可以看出,最小量化单位取得越小,得出的旁瓣高度越低. 这是很容易理解的,因为该值取得越小,每个阵元可能取的位置越多,

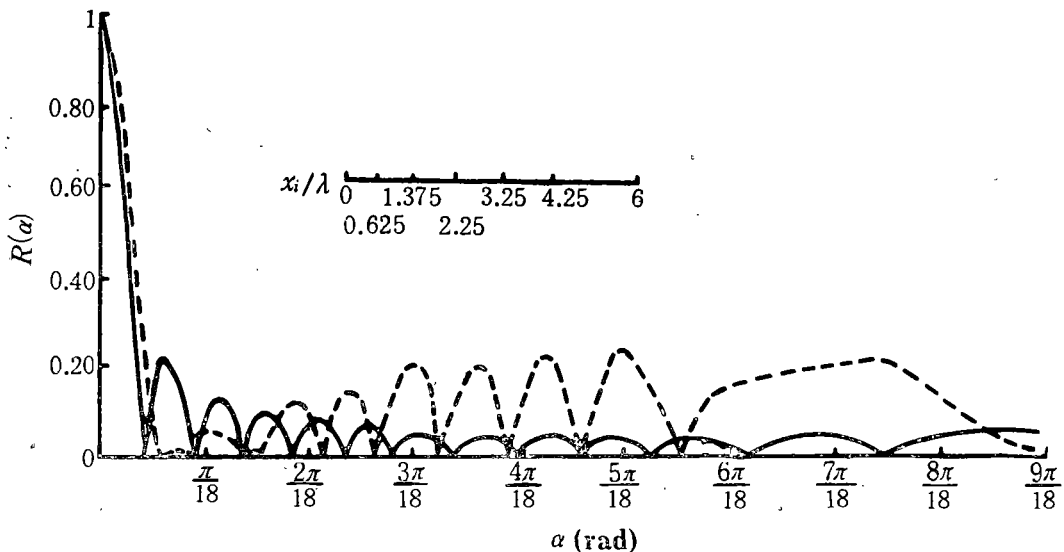


图1 指向性图和不等距阵的阵元距离

— 25元等距阵, $d/\lambda = 0.5$ --- 13元不等距阵, $x_0 = 1$

因而就可能把更好的阵元位置找出来. 在比较小量化单位下计算出的旁瓣高度远好于随机阵的估值, 一般比后者小二分之一. 它们很接近 H , 这说明计算出的结果接近最佳值.

图1是平均间距 x_0 为一个波长的13元阵的指向性函数和阵元距离. 为便于比较, 用实线画出间距为半波长的25元等距阵的指向性图. 从图可以看出, 一个13元不等距阵可以得到与25元等距阵相同的主瓣束宽和旁瓣级, 而阵元数却减少一半.

如前所述, 在运算之初, 各阵元距离的初值是按相应等距阵给出的. 为了得到更低的旁瓣级可以采用重复迭代法. 一般只需计算三次左右, 再增加次数将得到相同结果. 表2列出了一个平均间距为一个波长的13元阵的四次重复迭代结果. N' 取6, Δ 取0.125.

表2 各次迭代的计算结果

迭代次数	旁瓣高度	各阵元距离(单位: 波长)					
		0.5	1.125	1.75	3.625	4.5	6.0
1	0.294	0.5	1.125	1.75	3.625	4.5	6.0
2	0.234	0.875	1.625	2.50	3.375	4.25	6.0
3	0.231	0.75	1.50	2.375	3.375	4.25	6.0
4	0.231	0.75	1.50	2.375	3.375	4.25	6.0

从表中可以看出, 经过重复迭代使旁瓣进

一步降低。表 1 的值都经过了重复迭代。对于阵长为 50 个波长的 25 元阵,文献 [4] 得出的旁瓣高度为 0.295。对于完全相同的阵,本文计算的值为 0.263,这主要是利用了重复迭代的结果。即使经过重复迭代,本方法的计算量也只有文献 [4] 的十分之一,而计算出的旁瓣级却降低了。

在实际的线阵中,阵元往往具有指向性,本文计算了一个阵长为 25λ 的 11 元线阵。设线元指向性函数形如

$$\cos[(\pi/2) \sin \alpha]$$

最小量化单位取 0.25λ 。计算出阵的最高旁瓣高度为 0.318,而阵元无指向性的相应值为 0.446。可见阵元具有指向性使旁瓣高度明显下降,这是容易理解的。根据乘积定理,阵指向性等于阵元声中心组成的线阵的指向性和阵元指向性的乘积。由于阵元指向性函数大角度值很小,所以阵的指向性函数不可能在大角度出现高旁瓣。因此设计阵元具有指向性的不等距阵

等效这样一个问题:设计一个相应的点元不等距阵,而允许在大角度区域出现更高的旁瓣。由于旁瓣区域的能量基本不随阵元距离变化,因此允许大角度出现高旁瓣势必会引起较小角度内旁瓣的降低。

将改进的动态规划方法计算的结果做为初值代入逐步逼近法中^[3],结果可进一步得到改善。例如平均间距为一个波长的 13 元阵,最后计算结果为 0.218,而这里是 0.241。

参 考 文 献

- [1] B. D. Steinberg, Principles of Aperture and Array System Design, John Wiley and Sons, 1976, 126—130.
- [2] R. F. Harrington, IRE Trans. on Antennas and Prop., AP-9(1961), 187—192.
- [3] 兰军,声学学报,9-3(1984),161—169.
- [4] M. I. Skolnik, et al., IEEE Trans. on Antennas and Prop., AP-12(1964), 35—43.
- [5] 兰军,声学学报,待发表.

声光器件复透射率的确定

徐 介 平

(北京工业大学应用物理系)

1985 年 7 月 30 日收到

本文改进了 Rhodes^[1] 的理论,从 Fourier 光学的基本原理出发,系统地导出了声光器件复透射率的确切表达式,并明确地阐明了其中各项的物理意义,从而把声光信号处理理论纳入 Fourier 光的理论系统。其要点是选取 $\exp\{-j2\pi\xi x\}$ 作为空间 FT 的核,但选取 $\exp\{+j2\pi ft\}$ 作为时间 FT 的核。从原则上讲,利用本文导出的结果,可以确切地分析一切声光信号处理系统,而不会出现任何自相矛盾之处。

一、引 言

为了从理论上确切地分析各种声光信号处理系统(特别是声光相关器系统),确定声光器件的复透射率是至关重要的。在声光信号处理的早期文献中,理论分析都是定性的,因而在实验工作的某些关键地方,仍要靠经验来摸索。Rhodes 首先从 Fourier 光学的基本原理和信

号理论出发,导出声光器件的复透射率,从而可用 Fourier 光学理论来分析各种声光信号处理系统^[1]。但在 Rhodes 的文章中,存在不少不确切以至自相矛盾之处,关于 ± 1 级衍射的定义也与一般习惯不同。分析结果表明,为消除这些不确切和自相矛盾之处,必须从一开始就明确:应该选取 $\exp\{-j2\pi\xi x\}$ 作为空间 FT 的核,但却选取 $\exp\{j2\pi ft\}$ 作为时间 FT 的核,这相当于选取 $\exp\{j2\pi\xi(x - vt)\}$ 作为平面波的