

理论地震图计算方法

谢小碧 郑天愉 姚振兴

(中国科学院地球物理研究所, 北京 100101)

摘 要

近二十多年来, 随着理论地震学和计算技术的发展, 理论地震图的计算技术有了飞速发展。目前已能对不同的介质模型和震源计算各种体波、面波、地球自由震荡和静态位移场。它们在研究天然地震震源过程、地球内部结构、近场强地面运动、核爆炸监测以及地震勘探等领域中发挥了越来越大的作用。

目前常用的理论地震图计算方法主要包括积分变换法、离散数值方法和射线方法几大类。本文对这些方法分类进行了简单介绍, 并评论了各种方法的特点和各自的适用范围。

关键词 理论地震图, 积分变换法, 离散数值法, 射线方法。

一、引 言

理论地震图 (synthetic seismogram) 是对于给定的介质模型和震源用数学方法计算出来的理论的地球介质响应。虽然关于理论地震图的最初尝试甚至可以追溯到 1904 年 Lamb^[1] 的著名工作, 但只是近二十多年来由于理论地震学和计算技术的发展才使得理论地震图方法得到了飞速发展。目前已能以不同的精度模拟各种震源以及由它们所产生的各种体波、面波、地球自由震荡和静态位移, 并逐步成为研究地震震源过程、地球内部结构、近场强地面运动以及地震勘探等问题的有效工具, 得到了广泛的应用。

地震波理论的出发点是弹性动力学方程, 计算理论地震图实际上就是在特定的介质模型和震源条件下通过求解弹性动力学方程或波动方程获得介质中的位移场。由于实际震源和介质的复杂性, 在求解过程中常需针对不同的研究对象和目的对介质模型、方程或解的形式做出相应的简化, 由此即产生了计算理论地震图的各种实际方法。

根据对方程的不同处理方式, 理论地震图的计算方法大致可以分成这样几类: 第 1 类是建立在水平均匀介质或球对称介质模型之上的方法, 这类方法主要是借助于各种积分变换来对方程进行求解; 第 2 类方法是将波动方程直接离散化, 然后利用数值方法加以求解; 第 3 类是建立在高频近似和渐近级数解之上的射线方法以及对射线方法的各种改进。对于零频响应 (即静态问题), 弹性动力学方程中的惯性项可以略去, 方程退化为静力学方程, 对它的处理目前主要采用建立在水平成层介质模型上的方法。各类方法之间的关系如图 1 所示。

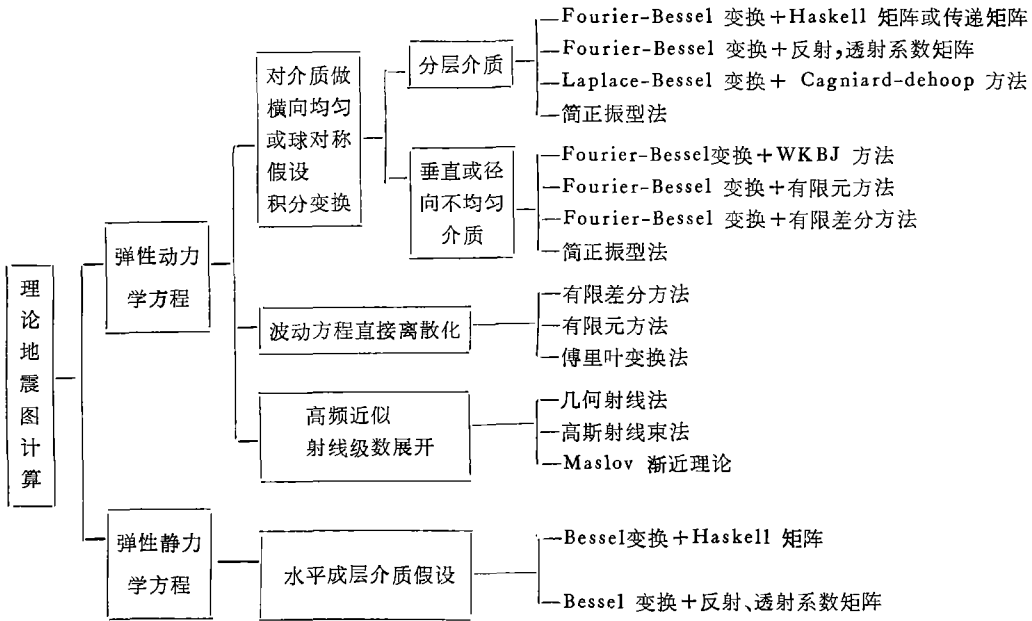


图 1 各种理论地震图计算方法之间的关系

二、建立在横向均匀或球对称介质模型上的方法

这类方法本质上是对介质进行简化，即用横向均匀介质或球对称介质来逼近实际介质。在大多数情况下地球介质的性质在深度方向变化最快，而在水平方向变化较为缓慢，因此在一级近似下把地球介质处理为垂直不均匀介质或水平成层介质往往是合适的。当震中距比较大时，地球曲率的影响不能忽略，这时可以使用球对称介质模型，或者通过地球展平变换来加以考虑^[2]。对于上述模型可以利用积分变换将波动解分解为水平波函数和垂直波函数两部分。对于水平成层介质通常用 Bessel 函数做水平波函数，而对球对称介质则可用球谐函数作为水平波函数，它们为计算带来极大的便利。

以水平成层介质为例，在柱坐标系中引入 Helmholtz 势，可以把矢量波动方程转变为关于势函数的标量波动方程，并使 P-SV 波与 SH 波解耦，然后引入适当的核函数把解表示为积分变换的形式。势函数通解的一般形式为

$$\phi = \sum_{m=0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \phi_m(z, s, k) e^{im\theta} e^{-st} J_m(kr) k dk ds, \quad (1)$$

其中 s 是时间变量 t 在象空间的变量， k 是空间变量 r 在象空间的变量， J_m 为 m 阶 Bessel 函数， m 的取值由震源的对称性决定。被积函数中的 $J_m(kr) e^{im\theta}$ 组成了水平波函数， ϕ_m 是垂直波函数，它满足二阶常微分方程或与之等价的一阶常微分方程组

$$\frac{d\phi_m}{dz} = B\phi_m, \quad (2)$$

B 由层内的介质参数确定。 ϕ_m 可以由 ϕ_m 等组成的波函数矢量，它的值可由 (2) 式

及具体问题的边界条件来确定。边界条件包括自由面条件、震源处的间断条件、各界面上的衔接条件以及不均匀层底部的出射条件等。对于垂直不均匀介质,虽然不存在势函数,但利用应力位移矢量仍然可以构成与(1)和(2)式类似的公式。求解位移场的主要工作即由常微分方程(2)式解 ϕ_m , 以及代入(1)式进行双重反变换。对于垂直波函数所满足的方程(2)可以有多种求解方式。对于(1)式中的象函数以及积分变换的反演方法也可以有不同的选择,这些不同的选择以及它们之间的不同组合方式就导致产生了各种理论地震图计算方法。

利用水平成层介质模型时,在层内介质性质是常数,由(2)式可以给出 ϕ_m 的解析解。在层与层之间可以利用 Haskell 矩阵^[3]、传播矩阵^[4]或者广义反射透射系数矩阵^[5-8]加以连接。当遇到梯度带时则利用一组薄层来模拟。对于介质性质随深度连续变化的介质可以利用更加直接的数值方法,例如有限元方法^[9]或者有限差分方法^[10,11]来求解(2)式;也可以利用一些近似方法,例如 WKB 方法^[12]。

对于积分变换式的不同处理主要表现在:对于 s 和 k 的选择,例如对时间变量是选用 Fourier 变换还是 Laplace 变换;对于空间变量的变换是选用水平波数还是波慢度。对 s 和 k 的积分次序,即先做时间域的反变换还是先做空间域的反变换,以及具体的积分技术,例如在复平面上的积分路径、 k 积分的范围、数值积分方法等。引入 Laplace 变换通常导致首先用 Cagniard-Dehoop 方法对时间变量做反演,得到的解相当于具有某一射线参数 p 的“地震射线”在接收点的贡献,把所有可能的射线贡献叠加起来就得到观测点的综合响应。因此这种方法也称为广义射线法。Helmberger^[13,14], Johnson^[15] 的方法均属这一范畴。当对时间变量采用 Fourier 变换时通常首先进行 k 积分,得出位移频谱后再利用快速傅里叶变换(FFT)得到时域解^[7,16-18]。进行 k 积分时可以利用标准的数值积分方法进行,但更好的是 Bouchon^[19] 提出的离散有限波数方法。该方法需要计算的波数比前者少得多,从而可以大大节省计算时间。

在一些情况下,具有某些特定入射方向的波对结果有较大贡献。这时可以在有限区间中进行 k 积分,例如早期的反射率法^[20],或者只对具有某些射线参数 p 的广义射线进行求和,这样可以大大节省计算时间,同时又不会严重影响结果的精度。

地球作为整体来说与一个分层球体近似。对于这样一个具有有限尺度的物体,由震源激发起来的任何振动都可以表示成具有不同角阶数和径向阶数的简正振型的叠加。每个振型都是一种特定的驻波,并具有各自的本征频率和本征函数,各本征函数相互之间是正交的。计算理论地震图的工作就是对于给定的地球模型寻找这些本征值以及相应的本征函数,同时用震源函数来确定展开式的系数,最后根据这些系数把地球对震源的相应叠加。原则上讲这一方法可以用来计算震源所激发的所有振动,但因随着频率的提高所需振型的数目将大大增加,对于短周期体波计算成本常常高得难以接受,实际上该方法主要用于计算地球自由震荡和面波的理论地震图。

周期比较短的面波可以被视为是上述大角阶数自由震荡的渐近形式,或者看成是计算全波理论地震图时复平面中极点的贡献。地震面波主要在接近地表的波导中传播,其几何衰减小于体波。在一定的震中距范围内,面波常常作为相对独立的震相被观察到,因此也常常作为独立的震相来加以计算。对于水平层状介质或垂直不均匀介质中震源激发

面波的计算, 同样可以使用简正振型叠加的方法。利用简正振型计算理论地震图的主要工作在于求解与径向或垂向变量有关的本征值问题, 并借此得到本征值与本征函数; 展开震源, 最后由本征函数叠加得到震源的响应。根据所用的模型在垂直方向或径向是连续变化的还是分层的, 目前可供采用的几种计算方法分别是数值方法、传播矩阵方法及变分法^[21-23]。

三、建立在波动方程离散化基础上的数值方法

如果介质中界面形状复杂或者存在横向不均匀性, 则水平均匀模型的假设不能成立。此时直接将方程离散化的有限差分方法、有限元方法或傅里叶方法比较有效。原则上讲这类方法可以适用于任意复杂的介质, 并且可以给出介质中所有的反射波、转换波、首波以及衍射和散射震相。但过分细致地划分网格将使计算成本迅速增加, 因此, 目前这类方法主要用于研究约 100 个波长范围之内的波动问题。

利用有限差分法解波动方程或弹性动力学方程时, 是利用对空间和时间的差商来代替原来方程中的微商, 然后通过求解差分方程来逼近微分方程的解。在利用有限差分方法计算理论地震图方面, Alterman 及其合作者^[24,25]做了不少开创性的工作。Kelley 等^[26]基于二阶波动方程对 P - SV 波给出了二阶精度的有限差分算法。Virieux^[27,28] 则基于一阶方程组的形式对 SH 波和 P - SV 波分别给出了二阶精度的有限差分算法。Bayliss 等^[29]给出了四阶精度的算法。

有限元方法则是将连续介质分割成许多多边形的小单元, 整个介质中的位移场由多边形接点的位移来确定, 所有的力均通过接点来传递。对于每个接点都列出联系接点位移、作用力、质量和刚性的方程, 然后构成关于整个介质的联立方程组, 并用适当方法求解。对于利用有限元方法解波动问题可参阅 Lysmer 等^[30]的文章, 廖振鹏^[31]、王妙月等^[32]、范祯祥和邓玉琼^[33]分别给出过一些二维有限元方法的计算结果。

傅里叶方法(或称伪谱法)是近几年来提出的另一种计算波动问题的数值解法^[34,35]。该方法在求解方程时, 把作为空间变量函数的位移场用 FFT 转换到波数域中。方程中对空间变量的偏导运算在波数域中等价于简单地乘上一个波数 ik , 再利用反 FFT 变换回空间域中, 即完成了对空间变量的偏导运算。对时间变量的偏导运算一般仍借助有限差分方法。由于 FFT 对每个波长只需要 2 个节点, 因此这个方法可以大大减少对计算机内存的需求。最近已有人尝试利用这一方法求解三维模型中的波动问题。

利用上述几种数值方法计算地震波传播问题时, 所遇到的一个重要问题是由空间离散化和时间离散化所带来的数值频散。Alford 等^[36], Schreyer^[37], 廖振鹏和刘晶波^[38]以及 Daudt 等^[39]都详细讨论过这一问题。此外, 地震学中所遇到的问题常常是无界空间或半无限空间中的波传播问题, 但数值方法则不得不在有限的区间中进行, 因此如何选择适当的边界条件, 以使人为边界的存在尽量少影响或不影响内部区域是另一个重要问题。为此需引入一类被称为吸收边界或辐射边界的边界条件, 其中包括 Lysmer 和 Kuhnenyer^[40]的粘性边界条件, Clayton 和 Engquist^[41,42]的傍轴边界条件, 廖振鹏等^[43]基于多次透射基础上的透射边界条件, 以及一些更复杂的吸收边界^[44-46]。

鉴于目前计算机内存和速度的限制,利用有限差分 and 有限元方法计算三维模型在理论上虽然是可行的,但目前很少用于实践。因此上述有限差分和有限元算法基本上都是针对二维线源模型的。为解决这个问题一些作者发展了通过计算二维解获得近似点源响应的方法。在这方面, Vidal 等^[47]、Helmberger 等^[48]、谢小碧和姚振兴^[49]发展了把线源响应通过变换转换为点源响应的方法。而 Yuan 等^[50]则利用 Alterman 轴对称介质的假设来获得点源响应。

离散数值方法已被成功地用于解决一些复杂介质中的地震波传播问题。例如波在非均匀介质中或不平整地表的散射问题;横向不均匀介质中的近场强地面运动问题以及复杂构造中的地震勘探问题等。

四、建立在射线级数基础上的方法

如前所述,对于横向不均匀介质,第 2 节中所述的精确方法难以应用;第 3 节中给出的离散化方法虽能给出完全解,但计算成本比较高;而射线类的方法则具有计算成本低、速度快的特点。射线方法是一种建立在射线级数展开基础上的高频近似方法,其主要限制是要求介质特性在一个波长范围内变化不要太剧烈。由于上述原因,这种方法在地壳测深和勘探地震学中应用比较广泛。而在近场,特别是体波和面波尚未很好分离的区间内或散射比较严重的介质中,其精度和应用前景尚待检验。

射线类方法中最有代表性的是渐近射线法 (ART)^[51,52],它可以被视为几何光学在地震学中的直接推广。假设在频率域中波动方程的解 $\phi(\omega, x)$ 可以表示成 $i\omega$ 复幂的级数

$$\phi(\omega, x) = \phi_0(\omega) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A^{(n)}(x)}{(-i\omega)^n} e^{i\omega T(x)}, \quad (3)$$

其中 $\phi_0(\omega)$ 是初始脉冲的波谱, $A^n(x)$ 是振幅函数, $T(x)$ 是传播时间。(3)式的特点是对频率 ω 和空间变量 x 的依赖性已经分离,而且在高频情况下以首项的贡献为主。将级数解(3)式代回频域波动方程中,并使 ω 同次幂的系数为零,即可得到关于走时 T 的程函方程和关于振幅 A 的输运方程。根据这些方程解出首项系数,即可得到高频渐近解。渐近射线的特点是十分简洁,而且在大部分情况下能够较好地描述体波的传播路径、走时和振幅;但在一些特殊区域中则不能给出对于波的正确描述。例如在焦点附近的奇异性会导致振幅趋向无穷;在影区中无法得出衍射震相;对临界入射、首波、介质中的速度间断以及间断面形状的不连续性也很难处理。此外,在实际应用中还会遇到一些数值运算方面的困难,如费时的两点追踪和对局部介质的高度敏感性等。

针对渐近射线方法的这些不足,近年来在射线理论的基础上发展了一批新方法。它们保留了射线方法的简洁性并部分地克服了射线方法的不足之处。这些方法包括 WKBJ-Maslov 方法^[12,53,54]、高斯射线束法^[55,56]。高斯射线束方法把射线概念与波动理论结合起来,在高频近似下在几何射线附近用抛物线方程来近似波动方程,并构造一个集中在射线附近的波动方程近似解,在焦点处这个解不存在奇异性。该射线解不但对射线的终点有贡献,而且对其周围的邻近接收点也有贡献。在震源处把波场分解成许多射线的贡献,

然后把这些贡献通过介质传播出去,在接收点处求出邻近高斯射线的贡献的加权和,即得到该点的波场。Maslov 渐近方法是一种比高斯射线束方法更加普遍更加严格的方法,它可以被认为是适用于水平成层介质的 WKBJ 法向三维不均匀介质的推广,同时也可以看成是射线法向积分变换法的推广。因此 Maslov 法在射线法和积分变换法之间建立了一座桥梁。它把物理空间中的问题变换到象空间来处理,避开了物理空间中出现的奇异现象,从而可以包括衍射、焦散等几何射线方法所不能计算的震相。高斯射线束法和 Maslov 渐近方法均不需要精确的两点射线追踪,同时还可以包括渐近射线解所不能包括的与频率有关的效应。

五、其他理论地震图计算方法

除前面提到的各种理论地震图计算方法之外,为满足研究特定问题需要,有时将已有的计算方法进行一些修改或组合,以适应新的要求。例如通常的简正振型法仅适用于水平均匀层模型。Kennet^[57]利用扰动法使简正振型法可以适用于层内具有一定横向不均匀性的水平层模型。由于引入了横向不均匀性,各简正振型之间不再是完全正交的,因而存在一定的能量交换。与此类似, Kohketsu^[58]对反射率法进行了一些修正,使其能够适用于分界面有一定起伏的分层介质。而 Hong 和 Helmberger 等^[59]、曹柏如和姚振兴^[60]则在广义射线法中引入了倾斜界面。

在另外一些情况下,由源到接收点的传播路径可以分成两部分:一部分传播路径比较长,但介质相对比较简单;另一部分传播距离比较短,但介质结构比较复杂,而且其中的二维或三维不均匀性对所研究的问题具有决定性的影响。在这种情况下,如果在全程都使用适用于复杂模型的方法来计算,计算量往往大得难以接受,而利用较简单的模型来计算又会丢失物理问题的特点。为克服这一困难就产生了五花八门的混合(hybrid)方法,即分别选用不同的方法来计算两段不同介质的波场,在两者之间用适当的方法把波场衔接起来。例如将射线法与有限差分法结合起来,或将边界元法与水平均匀层中的算法结合起来等。

六、对零频响应-位错静态位移场的计算

强烈地震发生时,断层活动除辐射出弹性波外,还使震中附近的介质发生大规模的永久形变,这种形变是介质对震源响应的零频部分,详细研究断层活动引起的永久地形变可以为我们提供许多有关震源活动的信息。为此目的需要解决位错源静态位移场的计算问题。在弹性动力学方程中略去与时间有关的惯性项,即可得到弹性静力学方程。对静态位移场的处理方法与波动问题具有极大的相似性。不同之处在于,波动问题中要对时间变量和空间变量做双重变换,而静态问题不存在对时间变量的变换。对均匀弹性半空间中位错位移场的计算比较早的是 Steketee^[61,62](1958)的工作; Maruyama^[63]推广了这一工作,并给出了均匀弹性半空间中位错点源产生的静态位移场的解析解。这些结果被推广到处理有限断层的情况。最初处理特定的断层,例如 Chinnery^[64], Press^[65]给出

了均匀弹性半空间中矩形垂直断层在地表产生的位移场; Savage 和 Hastie^[66] 给出了矩形倾斜断层做倾向滑动时产生的位移场; 稍后, Mansinha 和 Smylie^[67] 给出了泊松固体半空间中具有任意倾角和错动方向的矩形断层的位移解; 陈运泰等^[68] 给出了拉梅常数不相等时同一问题的解; Sato 和 Matsu'ura^[69] 则给出了相应的应变和倾斜解。

由于实际地球介质既不是均匀的,也不是水平的,为适应实际情况的需要并估计它们对位错位移场的影响,不少作者考虑了更加复杂的情况。在震中附近实际地球介质常常可以用一组具有不同弹性常数的介质层来表示,当各层中弹性常数相差较大,特别当存在松散层时,往往会对地表位移场产生较大的影响。因此在介质比较复杂的情况下,就需要考虑分层介质模型。对此,主要采用积分变换的方法求解。Ben-Menaham 等^[70], Singh^[71], Sato 及其合作者^[72,73]以及徐果明和周惠兰^[74]曾分别给出利用 Haskell 传播矩阵方法计算水平成层介质中位错点源产生的静态位移场的方法; 谢小碧和姚振兴^[75]则给出了利用广义反射、透射系数矩阵的计算方法; 对于球形地球的影响, Ben-Menaham 等^[76,77], Smylie 和 Mansinha^[78] 曾进行过讨论。与计算波动问题时类似,如果给弹性常数以复值,则可将粘弹性模型引入计算,并以此研究伴随断层运动所发生的准静态蠕变问题。Rundle^[79,80] 利用这一方法研究过地震后断层的蠕变恢复等问题。

七、对介质吸收的考虑

传统的地震学建立在弹性力学即 Hooke 定律的基础上,由此得出的波传播过程并不涉及能量的耗散。但在实际介质中传播的波都随着距离和时间而衰减,表明弹性波所携带的能量逐步变成热能耗散在介质中了。构成地球介质的岩石是一种多晶固体,其中晶粒大小、晶面取向等特性以及空位、杂质、位错、空隙等微观或亚微观结构都对介质的衰减特性有影响。在震害学中常常引用吸收、内摩擦或品质因数 Q 等宏观量来描述介质的衰减特性。目前的实验和观测事实表明,在小振幅情况下介质仍然可以看成是一个线性系统,因此可以利用线性粘弹性理论来描述。

在弹性力学中应力 σ 与应变 ε 之间满足虎克定律,对于线性粘弹性体应力与应变之间满足褶积形式给出的广义虎克定律

$$\varepsilon(t) = j(t) * \sigma(t), \text{ 或 } \sigma(t) = m(t) * \varepsilon(t),$$

其中 $j(t)$ 和 $m(t)$ 是相应的记忆函数。对上式作傅里叶变换或拉普拉斯变换可得

$$\hat{\varepsilon} = \hat{J}\hat{\sigma}, \text{ 或 } \hat{\sigma} = \hat{M}\hat{\varepsilon}.$$

上式与虎克定律有类比性,因此常称 J 和 M 为复柔性和复模量。将上述本构关系引入弹性动力学方程,可以解得随时间和距离衰减的波动。由线性粘弹性体中波传播的理论和因果性原理可以得出,介质的吸收必然伴随着介质中波速的频散,即众所周知的吸收-频散关系。已有不少作者发展了不同的模型来描述地球介质的吸收特性,例如 Futterman^[81] 的近常数 Q 模型; Kjartansson^[82] 的常数 Q 模型; Anderson 和 Minster^[83] 及 Muller^[84] 的幂函数 Q 模型以及这两种形式的吸收带模型^[85]等。

在理论地震图计算中可以通过多种方式引入衰减:一种是在频率域中用复模量或复速度代替原来的弹性模量和速度,并使其实部和虚部之间满足吸收-频散关系,从而得出

含衰减的波动解^[66]; 另一种方法是在时间域中对完全弹性解卷上吸收算子^[67]。上述第 1 种方法是精确方法, 但只能在频率域中进行, 且计算量比较大; 第 2 种方法计算简便, 而且既可以在频率域中进行也可以在时间域中进行, 这一点对于在时间域中求得的解(例如射线解或有限差分解)具有重要意义。缺点是当介质复杂并存在多重路径的贡献时其结果是近似的。

在离散数值方法中也可以直接引入粘弹性本构关系, 但目前仅能对简单的模型, 例如标准线性体等进行计算。

吸收-频散作用对于研究地震波传播理论以及利用地震资料反演地球内部结构有重要影响。此外 Q 值还与介质的应力状态、破碎程度、流体饱和度、温度、电导等有密切关系, 研究衰减特性可以为研究地球内部的物理状态提供线索, 因此在理论地震图计算中考虑衰减的影响是十分必要的。

八、结 语

前几节中已对若干常用的理论地震图计算方法分类进行了简单介绍。这些方法分别具有各自的特点, 大多在某些方面对模型进行了一定的简化。表 1 粗略地列出了这些方法所适用的模型特点、频率范围、传播距离以及它们的计算速度。对于这些方法我们很难简单地说明哪些是“好”方法。与其他利用数学方法研究物理问题的过程类似, 在利用理论地震图方法研究地震问题的时候, 首先需要根据研究目的对模型进行尽可能的简化, 同时又不致失去所要研究的特征。然后综合考虑所需的频率、传播距离以及所具有的计算能力来选择适当的计算方法。应该说, 能够使我们以尽量低的计算成本得到携带了所需物理信息的计算方法就是最佳方法。因此在选择计算方法之前, 常需要对研究目的以及各种计算方法的特点两方面都有一定的了解。本文的目的就是为现有的主要计算方法提供一个大致轮廓。

理论地震学和计算技术的发展大大推动了理论地震图计算技术的发展, 而地震波研究领域的需要又反过来对理论地震图的计算技术不断提出新的要求。目前在理论地震图

表 1 各种理论地震图计算方法的比较

方 法	适用模型	适用频率	适用距离	计算时间
简正振型法	垂直不均匀或球对称 ¹⁾	低	大	中等
反射率法	水平均匀层 ²⁾	中	中等	中等
广义射线法	水平均匀层 ²⁾	中、高	任意	较短
WKBJ 方法	垂直不均匀或球对称	中、高	任意	较短
DWFE, DWFD 法	垂直不均匀	低、中	中等	较长
有限差分、有限元、傅里叶法	二维或三维任意模型	任意	几十个波长	非常长
渐近射线法	二维或三维平滑模型	高	任意	短
高斯射线束法	二维或三维平滑模型	高	任意	短
Maslov 渐近理论	二维或三维平滑模型	高	任意	短

1) 选用不同的本征值问题解法, 可分别适用于分层模型或垂(径)向连续模型。

2) 利用地球展平变换后, 同样可以适用于弯曲地球模型。

计算方法方面的进一步探索主要包括: 1. 寻找更加高效的计算方法, 以便更经济地利用理论地震图方法研究各种实际问题; 2. 继续发展各种用以模拟实际介质中的地震波传播问题的方法, 例如粘弹性介质、各向异性介质、散射介质以及各种复杂结构中的波动问题; 3. 将波动的正问题和反问题结合起来, 发展波形反演方法等。

参 考 文 献

- [1] Lamb, H., On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid, *Philosoph. Trans. Roy. Soc. London*, **A203**, 1—42, 1904.
- [2] Chapman, C. H., The earth flattening transformation in body wave theory, *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, **35**, 55—70, 1973.
- [3] Haskell, N. A., The dispersion of surface waves in multilayered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **43**, 17—34, 1953.
- [4] Gilbert, F. and Backus, G., Propagator matrices in elastic wave and vibration problems, *Geophysics*, **31**, 326—332, 1966.
- [5] Kennett, B. L. N., Reflections, rays and reverberations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **64**, 1685—1696, 1974
- [6] Kennett, B. L. N., Seismic waves in a stratified half-space-II, Theoretical seismograms, *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, **61**, 1—10, 1980.
- [7] Kennett, B. L. N. and Kerry, N. J., Seismic waves in a stratified half-space, *Geophys. J.*, **57**, 557—583, 1979.
- [8] Yao, Z. X. and Harkrider, D. G., A generalized reflection-transmission coefficient matrix and discrete wavenumber method for synthetic seismograms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 1685—1699, 1983.
- [9] Olson, A. H., Forward simulation and linear inversion of earthquake ground motions, Ph.D. Thesis, University of California, San Diego, California, 1982.
- [10] Alekseev, A. S. and Mikhailenko, B. G., The solution of dynamic problems of elastic wave propagation in inhomogeneous media by a combination of partial separation of variables and finite-difference methods, *J. Geophys.*, **48**, 161—172, 1980.
- [11] Korn, M., Computation of wavefields in vertically inhomogeneous media by frequency domain finite-difference method and application to wave propagation in earth models with random velocity and density perturbations, *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, **88**, 345—377, 1987.
- [12] Chapman, C. H., A new method for computing seismograms, *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, **54**, 481—518, 1978.
- [13] Helmberger, D. V., The crust-mantle transition in the Bering Sea, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **58**, 179—214, 1968.
- [14] Helmberger, D. V., Generalized ray theory for shear dislocations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **64**, 45—64, 1974.
- [15] Johnson, L. R., Green's function of Lamb's Problem, *Geophys. J.*, **37**, 99—131, 1974.
- [16] Apsel, R. J., Dynamic Green's functions for layered media and applications to boundary-value problems, Ph. D. Thesis, University of California of San Diego, La Jolla, California, 1979.
- [17] Bouchon, M., A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **71**, 959—971, 1981.
- [18] 李幼铭, 一种近场理论地震图的 Haskell 矩阵算法, *中国地震*, **1**, 36—44, 1985.
- [19] Bouchon, M., Discrete wavenumber representation of elastic wave fields in three dimensions, *J. Geophys. Res.*, **84**, 3609—3614, 1979.
- [20] Fuchs, K. and Muller, G., Computation and synthetic seismograms with the reflectivity method and comparison with observations, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **23**, 417—433, 1971.
- [21] Takeuchi and Saito, Seismic surface waves, in *Methods in Computational Physics*, Vol. **11**, Academic Press, New York, 1972.
- [22] Gilbert, F., Excitation of the normal modes of the earth by earthquake sources, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **22**, 223—226, 1971.
- [23] Buland and Gilbert, F., Computation of free oscillations of the earth, *J. Comp. Phys.*, **54**, 95—114, 1984.
- [24] Alterman, Z. and Karal, F. C., Propagation of elastic waves in layered media by finite difference methods, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **58**, 367—398, 1968.

- [25] Alterman, Z. and Loewenthal, D., Computer generated seismograms, in *Methods in Computational Physics*, Vol. 12, Academic Press, New York, 1972.
- [26] Kelly, K. R., Ward, R. W., Treitel, S. and Alford, R. M. Synthetic seismograms: a finite difference approach, *Geophysics*, **41**, 2—27, 1976.
- [27] Virieux, J., *SH*-wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method, *Geophysics*, **49**, 1933—1957, 1984.
- [28] Virieux, J., *P-SV* wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method, *Geophysics*, **51**, 889—901, 1986.
- [29] Bayliss, A., Jordan, K. E., Lemesurier, B. J. and Turkel, E., A fourth-order accurate finite-difference scheme for the computation of elastic wave, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **76**, 1115—1132, 1986.
- [30] Lysmer, J. and Drake, L. A., A finite element method for seismology, in *Methods in Computational Physics*, Vol. 11, Academic Press, New York and London, 1972.
- [31] 廖振鹏, 近场波动问题的有限元解法, *地震工程与工程振动*, **4**, 1—14, 1984.
- [32] 王妙月、郭亚曦, 二维弹性波的有限元模拟及其初步实践, *地球物理学报*, **30**, 292—306, 1987.
- [33] 范炳祥、邓玉琼, 准各向异性粘弹性介质地震波的数字仿真, *地球物理学报*, **31**, 198—210, 1988.
- [34] Kosloff, D. D. and Baysal, E., Forward modeling by a Fourier method, *Geophysics*, **47**, 1402—1412, 1982.
- [35] Kosloff, D. D., Reshel, M. and Lowenthal, D., Elastic wave calculations by the Fourier method, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **74**, 875—891, 1984.
- [36] Alford, R. M., Kelly, K. R. and Boore, D. M., Accuracy of finite difference modeling of the acoustic wave equation, *Geophysics*, **39**, 834—842, 1974.
- [37] Schreyer, H. L., Dispersion of semidiscretized and fully discretized systems, in *Computational Methods for Transient Analysis*, Elsevier Science Publishers, 1983.
- [38] 廖振鹏、刘晶波, 离散网格中的弹性波动 (I), *地震工程与工程振动*, **6**, 1—16, 1986.
- [39] Daudt, C. R., Braile, L. W., Nowack, R. L. and Chiang, C. S., A comparison of finite-difference and Fourier method calculations of synthetic seismograms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **79**, 1210—1230, 1989.
- [40] Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L., Finite dynamic model for infinite media, *J. Eng. Mech. Div. ASCE*, **95**, 859—877, 1969.
- [41] Clayton, R. W. and Engquist, B., Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **67**, 1529—1540, 1977.
- [42] Clayton, R. W. and Engquist, B., Absorbing boundary conditions for wave-equation migration, *Geophysics*, **45**, 895—904, 1980.
- [43] 廖振鹏等, 瞬态波分析中的透射边界, *中国科学*, A 辑, **27**, 1063—1076, 1984.
- [44] Lindman, E. L., Free space boundaries for the scalar wave equation, *J. Comp. Phys.*, **18**, 66—78, 1975.
- [45] Randall, C. J., Absorbing boundary condition for the elastic wave equation, *Geophysics*, **53**, 611—624, 1988.
- [46] Randall, C. J., Absorbing boundary condition for the elastic wave equation: velocity-stress formulation, *Geophysics*, **54**, 1141—1152, 1989.
- [47] Vidale, J. E., Helmberger, D. V. and Clayton, R. W., Finite difference seismograms for *SH* waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, 1765—1782, 1985.
- [48] Helmberger, D. V. and Vidale, J. E., Modeling strong ground motions produced by earthquakes with two-dimensional numerical codes, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **78**, 109—121, 1988.
- [49] 谢小碧、姚振兴, 二维不均匀介质中点源 *P-SV* 波响应的有限差分近似算法, *地球物理学报*, **31**, 540—555, 1988.
- [50] Yuan, Y., Yoshizawa, S. and Osawa, Y., Strong ground motion simulation of the 1976 Ninghe, China earthquake, *Bull. Earthq. Res. Ins. Univer. Tokyo*, **61**, 97—127, 1986.
- [51] Cerveny, V., Molotkov, I. A. and Psencik, I., *Ray Method in Seismology*, Praha, Karlova Universita, 1977.
- [52] Cerveny, V., Ray synthetic seismograms for complex two dimensional and three dimensional structures, *J. Geophys.*, **58**, 2—26, 1985.
- [53] Chapman, C. H. and Drummond, R., Body wave seismograms in inhomogeneous media using Maslov asymptotic theory, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**, S277—S317, 1982.
- [54] Chapman, C. H., Ray theory and its extensions: WKB and Maslov seismograms, *J. Geophys.*, **58**, 27—43, 1985.
- [55] Cerveny, V., Expansion of a planewave into Gaussian beam, *Stud. Geophys. Geod.*, **26**, 120—131, 1982.
- [56] Cerveny, V., Popov, M. M. and Psencik, I., Gaussian beam synthetic seismograms, *J. Geophys.*, **58**, 44—72, 1985b.

- [57] Kennett, B. L. N., Guided waves propagation in laterally varying media, I Theoretical development, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **79**, 235—255, 1984.
- [58] Kohketsu, K., 2-D reflectivity method and synthetic seismograms for irregular layered structure, 1. SH-wave generation, *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, **89**, 821—838, 1987.
- [59] Hong, T. L. and HelMBERGER, D. V., Generalized ray theory for dipping structure, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **67**, 995—1008, 1977.
- [60] 曹柏如, 谢小碧、姚振兴, 模拟倾斜界面情况下区域地震范围内的长周期 PnI 波, *地球物理学报*, **35**, 185—192, 1992.
- [61] Steketee, J. A., On Volterra's dislocations in a semi-infinite medium, *Can. J. Phys.*, **36**, 192—205, 1985a.
- [62] Steketee, J. A., Some geophysical applications of the elasticity theory of dislocations, *Can. J. Phys.*, **36**, 1168—1198, 1985b.
- [63] Maruyama, T., Static elastic dislocations in an infinite and semi-infinite medium, *Bull. Earthq. Inst. Tokyo Univ.*, **42**, 289—368, 1964.
- [64] Chinnery, M. A., The deformation of the ground surface faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **50**, 355—372, 1961.
- [65] Press, F., Displacements, strains and tilts at teleseismic distances, *J. Geophys. Res.*, **70**, 2395—2412, 1965.
- [66] Savage, J. C. and Hastie, L. M., Surface deformation associated with dip-slip faulting, *J. Geophys. Res.*, **71**, 4897—4904, 1966.
- [67] Mansinha, L. and Smylie, D. E., The displacement fields of inclined faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **61**, 1433—1440, 1971.
- [68] 陈运泰, 林邦帮, 林中洋, 李志勇, 根据地面形变的观测研究 1966 年邢台地震的震源过程, *地球物理学报*, **18**, 164—182, 1975.
- [69] Sato, R. and Matsu'ura, M., Strains and tilts on the surface of a semi-infinite medium, *J. Phys. Earth*, **22**, 213—221, 1974.
- [70] Ben Menahem, A. and Singh, S. J., Multipolar elastic fields in a layered half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **58**, 1519—1572, 1968.
- [71] Singh, S. J., Static deformation of a multilayered half-space by internal sources, *J. Geophys. Res.*, **75**, 3257—3263, 1970.
- [72] Sato, R., Crustal deformation due to dislocation in a multi-layered medium, *J. Phys. Earth*, **19**, 31—46, 1971.
- [73] Sato, R. and Matsu'ura, M., Static deformation due to the fault spreading over several layers in a multi-layered medium, Part I, Displacement, *J. Phys. Earth*, **21**, 227—249, 1973.
- [74] 徐果明、周惠兰, *地震学原理*, 科学出版社, 北京, 1982.
- [75] 谢小碧、姚振兴, 计算位错点源静态位移场的广义反射、透射系数矩阵和离散波数方法, *地球物理学报*, **32**, 270—280, 1989.
- [76] Ben Menahem, A., Singh, S. J. and Solomon, F., Static deformation of a spherical earth model by internal dislocations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **59**, 355—372, 1969.
- [77] Ben Menahem, A., Singh, S. J. and Solomon, F., Deformation of a homogeneous earth model by finite dislocations, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **8**, 591—632, 1970.
- [78] Smylie, D. E. and Mansinha, L., The elastic theory of dislocations in real earth models and changes in rotation of the earth, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **23**, 329—354, 1971.
- [79] Rundle, J. B., Viscoelastic crustal deformation by finite quasistatic sources, *J. Geophys. Res.*, **83**, 5937—5945, 1978.
- [80] Rundle, J. B., Viscoelastic-gravitational deformation by a rectangular thrust fault in a layered earth, *J. Geophys. Res.*, **87**, 7787—7796, 1982.
- [81] Futterman, W. I., Dispersive body waves, *J. Geophys. Res.*, **67**, 5279—5291, 1962.
- [82] Kjartansson, E., Constant Q -wave propagation and attenuation, *J. Geophys. Res.*, **84**, 4737—4748, 1979.
- [83] Anderson, D. L. and Minster, J. B., The frequency dependence of Q in the earth and implications for mantle rheology and Chandler wobble, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **58**, 431—440, 1979.
- [84] Muller, G., Rheological properties and velocity dispersion of a medium with power-law dependence of Q on frequency, *J. Geophys.*, **54**, 20—29, 1983.
- [85] Minster, J. B., Transient and impulse responses of a one dimensional linearly attenuating medium, I, Analytical results, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **52**, 479—501, 1978.
- [86] O'Neil, M. E. and Hill, D. P., Causal absorption: its effect on synthetic seismograms computed by the re-

flectivity method, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **69**, 17—25, 1979.

- [87] Carpenter, E. W., Absorption of elastic waves—An operator for a constant Q mechanism, in *Seismic Wave Attenuation*, Society of Exploration Geophysics, U. S. A., 1980.

METHODS OF SYNTHETIC SEISMOGRAMS —A REVIEW

XIE XIAO-BI ZHENG TIAN-YU YAO ZHEN-XING

(*Institute of Geophysics, Academia Sinica, Beijing 100101*)

Abstract

During the last two decades, the technique of synthetic seismograms has been developed rapidly along with the developments of theoretical seismology and computer science. Today seismologists can synthesis the body waves, surface waves, free oscillations and calculate static deformation for various kind of earth models and sources. The methods of synthetic seismograms have been widely used for investigating earthquake source processes, structure of the earth's interior, strong motion seismology and seismic exploration.

Various types of methods, e.g. integral transform method, purely numerical method and ray method, are widely used by seismologists to generate synthetic seismograms. This paper intends to give a brief review on these methods.

Key words Synthetic Seismograms, Integral transform method, Numerical method, ray method.