doi: 10.11720/wtyht.2020.1460

任运通,李貅,齐彦福,等.基于 MPI+OpenMP 的时间域航空电磁快速正演算法[J].物探与化探,2020,44(2):290-299.http://doi.org/10.11720/ wtyht.2020.1460

Ren Y T, Li X, Qi Y F, et al. Research on time domain airborne electromagnetic fast forward algorithm based on MPI+OpenMP[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(2):290-299. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1460

基于 MPI+OpenMP 的时间域航空电磁快速正演算法

任运通,李貅,齐彦福,曹华科

(长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054)

摘要:时间域有限元算法已被广泛应用于航空电磁三维正演模拟当中,然而由于航空电磁测区面积大,且采样密集,造成正演计算量巨大,传统的串行算法已经无法满足计算效率要求,为此,开展了并行加速算法研究以解决计算效率不足的问题。基于航空电磁系统的影响范围有限,采用局部网格技术将计算任务划分成多个子网格,即每个发射源一套网格,各网格的正演计算相互独立,不存在数据依赖性,具有很好的可并行性;利用 MPI 技术对多个子网格正演任务进行分配,在各个进程上进行并行计算;针对每个正演子网格,在进行时间域有限元算法正演模拟过程中,采用 OpenMP 技术对单元矩阵进行并行计算。典型地电模型的数值模拟结果表明本文开发的 MPI+OpenMP 并行正演算法可以有效提高正演速度,最高加速比可达 10 倍。

关键词:时间域航空电磁;MPI;OpenMP;有限元

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2020)02-0290-10

0 引言

时间域航空电磁法采用机载移动平台,通过线 圈发射大功率一次场电磁波信号,利用接收线圈接 收到感应的二次磁场,实现对地下电性结构及能源 矿产分布的精细探测。该方法具有分辨率高、探测 速度快、通行性极好等诸多优点,已被广泛应用于油 气资源、环境工程和金属矿产等领域^[16]。然而,传 统的电阻率成像和一维反演技术已经无法满足三维 问题解释的要求,开展三维反演解释技术研究是当 前的热点问题,作为反演的基础,时间域航空电磁三 维正演算法受到越来越多的关注。

目前,时间域航空电磁三维有限元正演方法主 要分为间接法和直接法两种。其中的间接法是基于 频率域麦克斯韦方程组,首先计算频率域响应,再通 过时频转换方法转换到时间域^[7-10]。由于间接算法 存在稳定性差等诸多问题,人们普遍将研究方向转 移到了时间域直接算法,直接求解时间域电磁响应。 2010年,Um等^[11]采用非结构化网格剖分策略,对 电性源的海洋三维瞬变电磁场进行了时间域矢量有 限元的三维正演模拟计算。2016年,李贺等^[12]人 研究了直接时间域矢量有限元瞬变电磁三维正演模 拟方法。2017年,齐彦福等人^[13-14]基于航空电磁 footprint的局部网格策略,利用非结构矢量有限元方 法,对复杂介质情况下的时间域三维航空电磁响应 进行了进一步模拟研究。然而,由于航空电磁法采 用同时移动发射源和测点的方式进行观测,且采样 密集,每次移动测点均需求解一次正演方程,产生巨 大的计算量,传统的串行计算方法无法满足未来三 维反演的效率要求。考虑到并行计算可以有效提高 程序的运算效率,解决相同数量的问题所需执行的 时间更短,开展了基于 MPI+OpenMP 并行技术的时 间域航空电磁快速正演算法研究。

目前广为使用的并行加速技术有两种,分别是 MPI(Message Passing Interface)和 OpenMP(Open Multi-Processing)并行技术。MPI和 OpenMP 均需 要与计算机语言结合使用,因两者较好的通信性和

收稿日期: 2019-09-24; 修回日期: 2019-12-03

作者简介:任运通(1995-),男,长安大学硕士,研究方向为瞬变电磁探测

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1502605);国家自然科学基金重点项目(41830101)

通讯作者: 李炳 韵据),男,教授、博导,主要从事瞬变电磁场的理论与应用方面的研究工作

可移植性而受到广泛地应用。在尺度上, MPI 多为 基于多台处理机上的跨节点并行方法, OpenMP 主 要通过一些指令集对现有的 Fortran 或 C/C++等程 序进行扩展。并行技术在提高计算效率上具有显著 优点,将该方法应用到地球物理数值模拟和数据处 理中具有良好的前景。早在 1997 年, Newman 和 Alumbaugh^[15]对三维大地电磁正演方法以及灵敏度 矩阵进行了深入研究,成功将并行加速技术应用到 了电磁反演当中,实现了多个节点的并行加速计算, 极大推动了并行计算技术在地球物理领域的发展。 国内对于并行计算技术应用到地球物理的研究,起 步虽然稍晚于国外,发展却并不逊色。2005年荣莹 等^[16]实现了基于 MPI 的处理机集群并行计算系统 平台的构建,在现有的硬件条件下提高计算力; 2006年,谭捍东^[17]等结合 MPI 的优越性,通过频点 并行的方式成功实现了大地电磁三维正演的并行计 算,得到了很高的加速比,验证了并行算法的稳定性 以及高效性;2011年,李小康[18]研究了频率域航空 电磁法有限单元二维正演的并行计算:2015年,陈 辉^[19]研究了基于 MPI 的航空瞬变电磁一维正反演, 提高了航空电磁一维模拟技术的计算效率。目前, 对于并行加速技术在电磁方法数值模拟中的应用主 要集中在大地电磁法,而航空电磁正演的并行算法 研究依然停留在一维正反演和二维的频率域正演阶 段。

本文将并行技术与时间域有限元算法相结合, 基于三维航空电磁局部网格之间相互独立的特性^[20],通过采用 MPI+OpenMP 的并行加速策略,在 保证正演结果可靠性的基础上,极大提高了时间域 航空电磁有限元三维正演的计算效率。首先通过与 串行有限元法和有限体积法进行对比检验本文并行 程序的可靠性,然后进行计算效率分析,讨论并行加 速比与硬件条件的关系,最后将该并行算法应用于 复杂起伏地表模型,模拟其航空电磁响应。

1 方法理论

1.1 时间域航空电磁有限元正演理论

时间域麦克斯韦方程组可以表示为[21]

$$\nabla \times \boldsymbol{e}(\boldsymbol{r},t) = -\frac{\partial \boldsymbol{b}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t}$$
(1)

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \boldsymbol{b}(\boldsymbol{r},t) = \boldsymbol{j}(\boldsymbol{r},t) + \frac{\partial \boldsymbol{d}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t} \qquad (2)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{d}(\boldsymbol{r},t) = q \tag{3}$$

其中,*t* 为时间,*r* 为位置矢量,*e*(*r*,*t*) j(r,t)、*d*(*r*, *t*)及*b*(*r*,*t*)分别表示*r*处在*t* 时刻电场强度、电流 密度、电位移矢量以及磁感应强度,*q*和 μ 分别表示 累积电荷和磁导率。本文假定介质的磁导率与自由 空间磁导率相同,即 $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m,介电常 数与自由空间介电常数 ε_0 相同,即 $\varepsilon = \varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m。电磁场之间具有如下本构关系:

$$\mathbf{j}(\mathbf{r},t) = \sigma \mathbf{e}(\mathbf{r},t) + \mathbf{j}_{s}(\mathbf{r},t) , \qquad (5)$$

$$\boldsymbol{d}(\boldsymbol{r},t) = \boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{e}(\boldsymbol{r},t) \quad , \tag{6}$$

$$\boldsymbol{b}(\boldsymbol{r},t) = \boldsymbol{\mu}\boldsymbol{h}(\boldsymbol{r},t) \quad , \tag{7}$$

其中: $j_s(\mathbf{r},t)$ 表示外部施加的源电流密度, $h(\mathbf{r},t)$ 和 σ 分别表示磁场强度和电导率。通过消去磁场,可 以获得电场扩散方程

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times \boldsymbol{e}(\boldsymbol{r},t) + \sigma \frac{\partial \boldsymbol{e}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t} + \frac{\partial \boldsymbol{j}_s(\boldsymbol{r},t)}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

本文采用非结构矢量有限元方法进行空间离 散,四面体单元中任意位置的电场可以表示为:

$$\boldsymbol{e}^{k}(\boldsymbol{r},t) = \sum_{i=1}^{6} e_{i}^{k}(t)\boldsymbol{n}_{i}^{k}(\boldsymbol{r}) , \qquad (9)$$

其中: $e^{k}(r,t)$ 是第k个单元第i条棱边上的电场值; $n_{i}^{k}(r)$ 是矢量插值基函数^[22],其表达形式为:

$$\boldsymbol{n}_{i}^{k}(\boldsymbol{r}) = (L_{i_{1}}^{k} \nabla L_{i_{2}}^{k} - L_{i_{2}}^{k} \nabla L_{i_{1}}^{k}) l_{i}^{k}, \quad (10)$$

 l_i^k 是第 k个单元第 i 条 楼 边上的长度, $L_{i_1}^k$ 和 $L_{i_2}^k$ 是第 i 条 楼 边上的两个节点 i_1 和 i_2 的标量插值基函数^[23]。通过 伽 辽 金 方 法 可以 获取 有限 元 控制 方程:

$$\boldsymbol{M} \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{e}(t)}{\mathrm{d}t} + \boldsymbol{S}\boldsymbol{e}(t) + \boldsymbol{J} = 0 , \qquad (11)$$

其中:*M*、*S*分别为质量和刚度矩阵,*J*为电流源项, 针对每个单元,可由下面三式给出

$$\boldsymbol{M}_{i,j}^{k} = \iint_{V^{k}} \boldsymbol{\sigma}^{k} \boldsymbol{n}_{i}^{k}(\boldsymbol{r}) \cdot \boldsymbol{n}_{j}^{k}(\boldsymbol{r}) \,\mathrm{d}V , \qquad (12)$$

$$\boldsymbol{S}_{i,j}^{k} = \frac{1}{\mu} \iint_{V^{k}} \nabla \times \boldsymbol{n}_{i}^{k}(\boldsymbol{r}) \cdot \nabla \times \boldsymbol{n}_{j}^{k}(\boldsymbol{r}) \,\mathrm{d}V \,, \quad (13)$$

$$\boldsymbol{J}_{i}^{k} = \iint_{V^{k}} \boldsymbol{n}_{i}^{k}(\boldsymbol{r}) \cdot \frac{\partial \boldsymbol{j}_{s}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t} \mathrm{d}V , \qquad (14)$$

其中 V 是单元的体积。由于各个单元相互独立,因此 M^{*}、S^{*}和 J^{*}可以采用 OpenMP 并行技术加速计算。针对发射源,将发射线圈分解为若干段导线,每段近似为一个电偶极子^[24]每个电偶极子可以表示为:

 $j_s(\mathbf{r},t) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s) \mathbf{v} I(t) dl$ 。 (15) 上式中:I(t)表示 t 时刻的电流强度, dl 表示电偶极 子长度, \mathbf{v} 表示电流方向, δ 表示脉冲函数。然后, 利 用二阶后推欧拉公式对有限元方程(11)进行时间 • 292 •

域离散:

 $(3\boldsymbol{A} + 2\Delta t\boldsymbol{B})\boldsymbol{e}^{i+2}(t) = \boldsymbol{A}[4\boldsymbol{e}^{i+1}(t) - \boldsymbol{e}^{i}(t)] - 2\Delta t\boldsymbol{S}^{i+2},$ (16)

其中: Δt 为时间步长, $e^{i}(t)$ 表示第 i 时刻的电场值。 式(16)亦可简写为:

$$Fe = P , \qquad (17)$$

其中:F表示大型稀疏系数矩阵,P是右端项。当发 射阶跃电流波形时,在0时刻之前发射线圈中供恒 定电流,在全空间产生稳定的磁场,根据楞次定律可 知空间中任意位置的电场均为0,故电场的初始条 件为:

$$\boldsymbol{e}(\boldsymbol{r},0) = 0 \quad (18)$$

采用狄利克雷边界条件,根据电磁波在空间中 的几何指数衰减规律,可以通过加大计算区域的扩 边范围,使其满足

$$\boldsymbol{e}\mid_{\Gamma}=0, \qquad (19)$$

其中 *Γ* 表示计算区域的外边界。最后,采用直接求 解器 Pardiso 对线性方程组进行求解,即可获得全空 间的电场值,再利用法拉第电磁感应定律(式(1)) 计算磁场响应。

1.2 局部网格正演计算技术

大量的数值实验表明三维数值模拟结果的精度 受到网格质量的影响非常大,因此需要对导电大地 和发射源进行精细的网格剖分来获得高精度正演结 果。传统的时间域航空电磁三维正演模拟算法采用 全局网格加密方式,即通过一套网格对所有测点的 电磁响应进行模拟。然而,由于航空电磁法采样密 集且观测剖面长,导致正演网格单元数量巨大。如 果采用全局网格进行正演模拟,将产生巨大的计算 量,严重降低计算效率。考虑到航空电磁系统影响 范围有限(如图1所示),本文采用局部网格加密技 术,针对每个测点或者相邻的几个观测点分别设计 独立的网格,并分别在局部网格上进行正演模拟,以 此在保证结果可靠性的同时提高计算效率。





局部网格技术根据航空电磁系统的影响范围设 计合理的局部精细网格。图2展示了全局网格和局 部网格,其中图2a表示全局网格,图2b、c、d则分别 表示针对测线上不同测点所设计的相互独立的局部 网格。从图中可知全局网格对测线上所有测点、测 线下方地空分界面以及异常体部分均进行了相对细 致的网格剖分,因此造成网格数量较大,导致正演模 拟的计算量剧增,计算效率降低。而局部网格仅仅 对异常体、当前测点位置以及其下方的地空分界面 进行局部加密,对单个测点进行单独求解,因此所使 用的网格数量大大降低,计算量减小。

2 并行加速

2.1 基于 OpenMP 的并行加速

OpenMP 采用分叉—合并(Fork-Join)执行模式。一个 OpenMP 程序开始于一个单一的线程,该进程又称作主线程,通过并行指令对程序的并行区间进行定义,在这个区间中程序块由多个线程自动分配任务及并行执行,线程数由主线程决定,在一个大型程序中可以嵌套多个 OpenMP 并行区间,其中并行区间由一组 \$ OMP 指令进行开启(! OMP PARALLEL)和关闭(! OMP END PARALLEL)。图 3 是 OpenMP 并行模式的示意图。

2.2 基于 MPI 的并行加速

MPI 需要用头文件 use mpi 进行声明,然后在主 进程(即节点)中进行初始化,开启 MPI 并行环境, 获取进程个数及编号,再将多个任务合理地分配到 各个进程并传输对应的数据,然后分别进行计算,最 后汇集到主进程并关闭并行环境,如图 4 所示。

2.3 并行程序设计及实现

由于航空电磁系统在每个观测点处的灵敏区域 相对于总计算区域来说远远不及,因此仅仅在观测 点的一定位置范围内对网格进行加密即可满足计算 的精度要求,针对每个观测点分别单独设计独立的 网格来提高计算效率。

时间域航空电磁三维正演各个测点计算相互独 立,不存在数据依赖关系,具有非常好的并行性,在 三维正演的基础上实现了基于 MPI 的多测点并行 计算,在独立网格内实现了基于 OpenMP 的单元矩 阵并行计算。程序采用主从模式,整个程序的基本 结构及运行流程由主进程把控,主要负责读取模型 参数、数据传输以及对并行任务的分配,子进程负责 接收来自主进程传递的消息、对分配的任务进行计 算以及输出本进程的计算结果。为了充分利用计算







图 3 OpenMP 并行模式示意 Fig.3 OpenMP parallel mode schematic

资源提高计算效率,主进程在完成任务分配和数据 传输的工作后也参与到测点的并行计算当中。

具体实现的流程如图 5 所示,主进程读取模型的整套网格参数,随后将其传递给其他子进程,之后 万方数据 各进程根据分配的网格参数计算模型的响应结果, 为了防止数据传输时发生通信冲突,采用各进程分 别输出各自的计算结果。



图 5 航空瞬变电磁三维正演并行计算流程

万方数据 Fig.5 Airborne transient electromagnetic three-dimensional Forward modeling parallel computing flow chart 3 模型算例

3.1 精度验证

为检验本文所开发的时间域航空电磁多粒度并 行正演方法的正确性,设计了如图 6 所示的水平板 状体模型,发射波形为阶跃波,发射电流强度为 435 A,通过全局网格和局部网格两种剖分方式,对异常 体上方 y=0 m 剖面上-400~400 m 范围内的 32 个 测点,分别进行正演模拟,且将正演结果与有限体积 方法的正演结果进行比对,进行数值精度验证。



图 6 水平板状体模型示意

Fig.6 Schematic diagram of the horizontal plate model

使用的集群服务器有 16 个型号为 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2609 v4 @ 1.70 GHz 的逻辑 CPU,每个 CPU 拥有 2G 内存和 4 个线程。采用时 间域有限元全局网格法、基于多粒度并行加速策略 的时间域有限元局部网格法以及有限体积方法分别 计算的电磁响应结果如图 7 所示,可以清楚地看出, 上述 3 种不同方法所计算的结果吻合得非常好,且 均对模型中的地下板状体有明显反映。这一结果有 效验证了本文并行算法的精度。

3.2 并行性能分析

为了分析基于 MPI+OpenMP 并行加速策略的 时间域航空电磁三维正演程序的并行加速效果,采 用上述水平块状体模型进行测算,根据控制变量法, 控制计算测点数为 32 和线程数为 4 保持不变,依次 对不同数量的进程进行比较,通过加速比和并行效 率两个参数来评估本文设计的三维正演并行程序。

令原有的串行程序在集群服务器单进程上的运行时间为 T_s ,经过多粒度并行优化后,运行所需时间为 T_p ,其中 P 表示开启的进程数,则加速比 S_p 可表示为:

$$S_p = T_s / T_p,$$
(20)
并行效率有序数据₁.



图 7 全局网格串行计算和局部网格并行计算 电磁响应结果对比

Fig.7 Comparison of electromagnetic response results between global grid serial computing and local grid parallel computing

$$e_p = S_p / P_{\circ} \tag{21}$$

测试结果见表 1。在计算测点数一定时,随着 进程数的增加,计算时间呈非线性下降趋势,加速比 逐渐增大,相反并行效率逐渐降低;当开启 16 个进 程时,采用多粒度并行加速后执行耗费的时间仅仅 是串行程序耗时的 1/10,同时并行效率达到最低。

表 1 基于 MPI+OpenMP 并行加速策略的行正演计算统计 Table 1 Line forward calculation statistics based on MPI+OpenMP parallel acceleration strategy

程序类型	进程数	计算时间/s	加速比	并行效率
串行	1	2136.4303	1	
	1	2139.7464	0.998	99.85%
	3	745.2973	2.867	95.55%
	5	499.5326	4.277	85.54%
并行	7	372.3317	5.738	81.97%
	12	266.8348	8.007	66.72%
	16	210.9645	10.127	63.29%

由图 8 可以发现以下特点:并行化后的正演程 序加速比与开启的进程数并不是整数倍关系,而是 呈非线性增长,且并行效率整体呈降低趋势。这是 因为在集群服务器上开启并行环境后,会占用一定 内存,且进程间进行数据传递需要占用时间,而且任 务量与开启的进程数不匹配时,计算任务少的进程 会率先完成计算量,但该进程并不会结束,而是要等 待未完成任务的进程,从而导致时间的损耗。所以 开启P个进程,加速比S。并不能达到P,且随着进



图 8 不同进程数的加速比(a)和并行效率(b)

Fig.8 Acceleration ratio (a) and parallel efficiency (b) for different node numbers

程数的增加 S。与 P 的差值越来越大。

3.3 复杂模型计算

考虑到地形起伏不平对航空电磁正演结果的影 响较为严重,采取四面体网格进行加密剖分后的计 算量较大,从而导致计算时间较长,因此利用多粒度 并行加速技术进行加速计算。导入地形文件数据模 拟起伏地表,并设计地下埋藏有块状及倾斜板状良 导体(图9)。设高阻围岩的电导率为0.01 S/m,块 状体和板状体的电导率为1S/m:倾斜版状体顶部 埋深 60 m, 垂直深度 250 m, 块状体顶部埋深 50 m, 边长 200 m。采用中心回线装置,飞行高度 30 m,发 射线框半径15m,线圈匝数为1,采用阶跃波激发。 全区设置 11 条测线,每条测线布设 171 个测点,共 计1881个测点,每个网格单元数约90000个,正演 过程共需进行9350次矩阵分解,327250次回代。 若采用传统串行计算时,总耗时约1968.623 min (32.8h),采用并行加速开启 16个进程后总计算时 间约194.336min(3.24h),消耗内存约5.2G,效率提

高了10.13倍,如表2所示。

表 2 计算情况统计

Fable 2	Calculation	statistics	table

	网格	消耗	分解	回代	计算总
	单元数	内存	次数	次数	耗时/h
串行 并行	约 90 000	约 5 350M 5.2G	9 350	327 250	32.8 3.24

图 10 是主剖面(x=0 测线)的多测道图,可以 看出在早期表现出地形的响应,到了晚期,地形影响 逐渐变小,表现出异常体的响应。图 11 呈现出整个 测区在四个时间点时的航空电磁响应结果,从图中 可以明显看出在时间早期,仅存在地形的响应,由于 地形凸起,电磁响应呈现出相对低异常,在 x=0,y= -500 附近,相对低异常达到极大值,由于块状异常 体处于凸起地形下方,相对于倾斜板埋藏较深,故随 着时间延长,倾斜板的异常响应率先显示出来,随后 出现块状体异常响应,且由于地下埋藏有异常体,导 致地形的影响减弱,到晚期时,电磁波穿过异常体,



图 9 复杂模型计算 Fig.9 Calculation of complex models



图 10 复杂模型主剖面(x=0 测线)多测道曲线 Fig.10 Multiple trajectory map of complex model main section (x=0 line)

仅剩地形的电磁响应。

4 结论

利用 MPI 实现了三维正演模拟中的多测点并 行计算和实现了独立网格内单元矩阵计算的 OpenMP 并行加速,最终实现了基于 MPI+OpenMP 并行加速策略对时间域航空电磁三维正演方法的并 行化,并得出并行化后的正演程序,其加速比随着开 启的进程 数增加呈非线性增长。

由于"并行开销"的存在,开启的进程数越多, 并行效率整体呈现出下降趋势,即使只开启一个进程,效率也比串行效率低。地形起伏模型的数值模 拟体现了本文并行优化后的正演方法的高效性,正 确高效的三维正演为三维反演提供了可能。

参考文献(References):

- Pemberton R H. Airborne electromagnetics in review [J]. Geophysics, 1962, 27(5):691-713.
- [2] Dobrin M. Introduction to Geophysical Prospecting [M]. 3ed.New York: McGraw-Hill, 1976.
- [3] Palacky G J. The airborne electromagnetic method as a tool of geological mapping[J]. Geophysical Prospecting, 2006, 29(1):60-88.
- [4] Wynn J C. Evaluating groundwater in arid lands using airborne magnetic/EM methods: An example in the southwestern U. S. and northern Mexico [J]. The Leading Edge, 2002, 21(1):62-64.
- [5] Smith R. Airborne electromagnetic methods: applications to minerals, water and hydrocarbon exploration [C]// CSEG 2010 Distinguished Lecture, 2010:7 - 10.
- [6] 殷长春,张博,刘云鹤,等.航空电磁勘查技术发展现状及展望 [J].地球物理学报,2015,58(8);2637-2653. Yin C 亿, 方数据, Liu Y H, et al. Development status and pros-

pects of aviation electromagnetic exploration technology [J]. Geophysics, 2015, 58(8): 2637 – 2653.

- Mogi T. Three-dimensional modeling of magnetotelluric data using finite element method [J]. J. Appl. Geophys., 1996, 35(2-3): 185 189.
- [8] Knight J H, Raich A P. Transient electromagnetic calculations using the Gaver-Stehfest inverse Laplace transform method [J]. Geophysics, 1982, 47(1):47-50, doi:10.1190/1.1441280.
- [9] 考夫曼 A A,凯勒 G V. 频率域和时间域电磁测深[M]. 王建 谋译. 北京:地质出版社,1987.
 Kaufman A A, Keller G V. Frequency domain and time domain electromagnetic sounding[M].Wang J M translation. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [10] 殷长春,张博,刘云鹤,等. 2.5 维起伏地表条件下时间域航空 电磁正演模拟[J]. 地球物理学报,2015,58(4):1411-1424.
 Yin C C, Zhang B, Liu Y H, et al. Simulation of time domain aeromagnetic forward modeling under 2.5-dimensional undulating surface conditions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58 (4): 1411-1424.
- [11] Um E S, Harris J M, Alumbaugh D L. 3D time-domain simulation of electromagnetic diffusion phenomena: A finite-element electricfield approach [J]. Geophysics, 2010, 75(4): F115 - F126, doi: 10.1190/1.3473694.
- [12] 李贺. 直接时间域矢量有限元瞬变电磁三维正演模拟[D].西安:长安大学,2016.
 Li H. Direct time domain vector finite element transient electromagnetic three-dimensional forward modeling [D]. Xi ´an: Chang'an University, 2016.
- [13] 齐彦福,殷长春,刘云鹤,等.基于瞬时电流脉冲的三维时间域 航空电磁全波形正演模拟[J].地球物理学报,2017,60(1): 369-382.

Qi Y F, Yin C C, Liu Y H, et al. A three-dimensional time domain aeromagnetic electromagnetic full waveform forward modeling based on instantaneous current pulse[J].Chinese Journal of Geophysics, 2017,60(1):369-382.

[14] 齐彦福. 复杂介质中时间域航空电磁数据仿真技术研究[D]. 长春:吉林大学,2017.



Fig.11 Complex terrain anomaly response surface map

Qi Y F. Research on time domain aeronautical electromagnetic data simulation technology in complex media [D]. Changchun: Jilin University, 2017.

- [15] Newman G A, Alumbaugh D L. Three-dimensional massively parallel electromagnetic inversion [J]. Geophysics, 1997, 128:345 – 354.
- [16] 荣莹,曹俊兴.基于 MPI 的机群并行计算系统平台构建[J].物 探化探计算技术,2005,27(1):89-91,100.
 Rong Y, Cao J X. The Construction of MPI-based cluster parallel computing system platform [J]. Computing Geophysical and Geochemical Exploration Technology,2005,27(1):89-91,100.
- [17] Tan H D, Yan T, Lin C H. Research on parallel algorithm of magnetotelluric 3D forward modeling [J]. Applied Geophysics, 2006 (4):197-202+261.
- [18] 李小康.基于 MPI 的频率域航空电磁法有限元二维正演并行计 算研究[D].北京:中国地质大学,2011.

Li X K. Research on finite element two-dimensional forward modeling parallel computing based on MPI in frequency domain aeromagnetic method[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.

[19] 陈辉. 基于 MPI 的航空瞬变电磁一维正反演[D].成都:成都理

工大学,2015.

Chen H. MPI-based aeronautical transient electromagnetic one-dimensional forward and inversion [D]. Changdu;Chengdu University of Technology, 2015.

- [20] Yang D, Oldenburg D W, Haber E. 3-D inversion of airborne electromagnetic data parallelized and accelerated by local mesh and adaptive soundings [J]. Geophysical Journal International, 2014, 196(3): 1492-1507.
- [21] Ward S H, Hohmann G W. Electromagnetic theory for geophysical applications [C]//Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, 1988, 1(3): 131-311.
- [22] Nédélec J C.Mixed finite elements in 3[J]. Numerische Mathematik, 1980, 35(3): 315-341.
- [23] Jin J M. The finite element method in electromagnetics, 2nd edn [M]. John Wiler and Sons, 2002.
- [24] Jahandari H, Farquharson C G.A finite-volume solution to the geophysical electromagnetic forward problem using unstructured grids
 [J]. Geophysics, 2014, 79(6): E287 - E302.

Research on time domain airborne electromagnetic fast forward algorithm based on MPI+OpenMP

REN Yun-Tong, LI Xiu, QI Yan-Fu, CAO Hua-Ke

(College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The time domain finite element algorithm has been widely used in airborne electromagnetic three-dimensional forward modeling. However, due to the large airborne electromagnetic measurement area and dense sampling, the forward calculation is huge, and the traditional serial algorithm cannot meet the calculation efficiency requirements. In view of such a situation, the authors carried out parallel acceleration algorithm research to solve the problem of insufficient computational efficiency. Based on the limited range of influence of aviation electromagnetic system, the local grid technology is used to divide the computing task into multiple sub-grids, that is, a set of grids for each source, and the forward calculations of each grid are independent of each other, and hence no data dependency is existent and there is good parallelism. In this paper, MPI technology is used to allocate multiple sub-grid forward tasks, and parallel computing is performed on each process. For each forward subgrid, in the forward modeling of the time domain finite element algorithm, the parallel matrix is calculated by OpenMP technology. The numerical simulation results of the typical electrical model show that the MPI +OpenMP parallel forward algorithm developed in this paper can effectively improve the forward speed, and the maximum acceleration ratio can reach 10 times.

Key words: time-domain airborne EM; MPI; OpenMP; finite element

(本文编辑:沈效群)