arXiv:2603.02971v1 [cs.DC] 3 Mar 2026

用于大气波模拟的可扩展网格耦合

Hannes Brandt* Tim Griesbach* Matthew Zettergren† Scott Aiton‡
JonathanSnively† Donna Calhoun‡ Carsten Burstedde*

摘要
我们介绍一种可扩展算法，该算法用于在两个求解器的重叠网格区域内插值解数据。这项功能对于获得原位耦合大气波模拟的全局一致解至关重要。我们给出运行时间，并讨论一次实际应用运行。

1 引言

将多个在不同但相互重叠的区域上运行的求解器耦合为一个系统，是多物理场模拟中经常遇到的一项具有挑战性的任务。通常可通过奇美拉网格方法 [14], 来处理这一问题；该方法将流体动力学模拟的计算域划分为相互重叠的网格。

1.1 问题说明。我们研究一种特定地球物理应用中的网格耦合，即从地球表面延伸至太空的大气波模拟——范围从对流层到热层（及其上方的电离层）。低层大气求解器 MAGIC [9] 与电离层求解器 GEMINI [18] 的计算域相互重叠。为获得全局一致的解，两者需要在重叠区域交换插值数据，这对分布式内存网格而言是一项重大挑战。我们采用一种可扩展的、基于八叉树森林的并行数据交换算法，以加快耦合过程；此前该过程是通过输入/输出 [15]完成的。

2 地球物理模拟框架

我们采用声重力波相互作用与耦合模型（MAGIC），模拟声重力波（AGWs）从其位于对流层（即地球大气的最低层）的原点传播至热层，并延伸到外逸层底部（海拔 ∼4000 千米）的行为。我们通过声重力波在电离层中引起的波动来观测它们；电离层与中间层上部和热层重叠，并向上延伸——

*德国波恩莱茵弗里德里希·威廉大学。
†安柏瑞德航空大学。
‡博伊西州立大学。

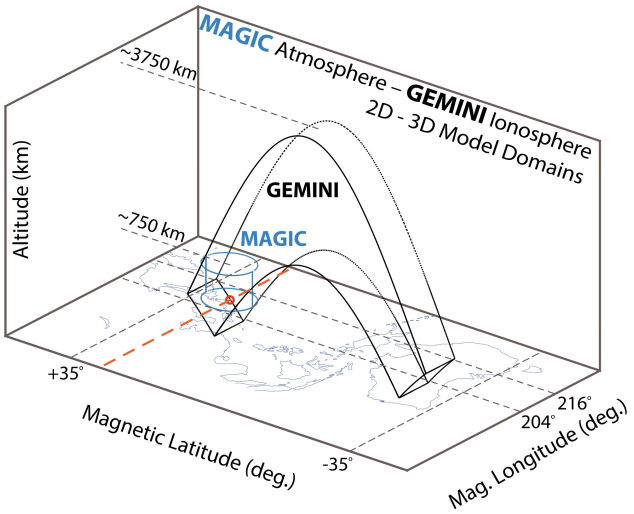

图 1：MAGIC 和 GEMINI 的典型计算域。

在那里，我们采用地球空间环境离子—中性相互作用模型（GEMINI）对其进行模拟。

2.1 MAGIC 是用于模拟瞬态强迫产生的大气重力波的模型。这些波可能由自然灾害产生，例如地震、海啸、火山喷发和爆炸，也可能由气象波产生 [13]。
MAGIC 求解从地球表面到外逸层顶范围内的非线性声学可压缩守恒 Navier–Stokes 方程 [11] ，并采用局部切平面笛卡尔坐标系。

2.2 GEMINI是一种通用电离层模型，旨在描述中小尺度现象 [16]。它在二维或三维空间中采用一般正交曲线坐标。GEMINI 将描述电离层等离子体动力学的方程与对极光电流和中性动力电流的静电处理相耦合 [16]。

2.3 软件栈。ForestClaw [5] 是一个库，它结合了八叉树森林库高度可扩展的自适应网格细化（AMR）能力

版权所有 © 2025 SIAM。未经授权，禁止复制本文。

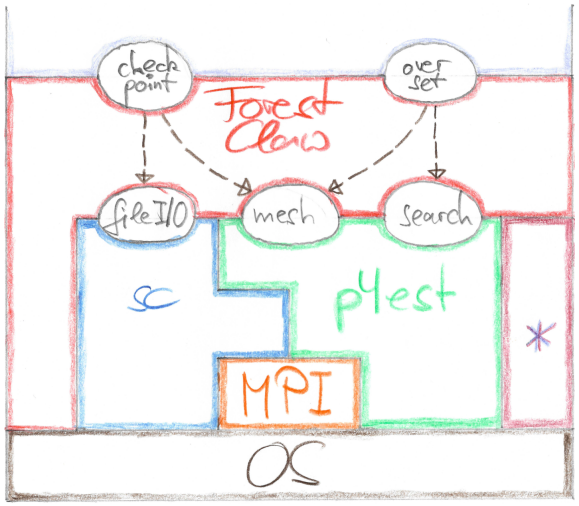

图 2：ForestClaw 的软件栈。

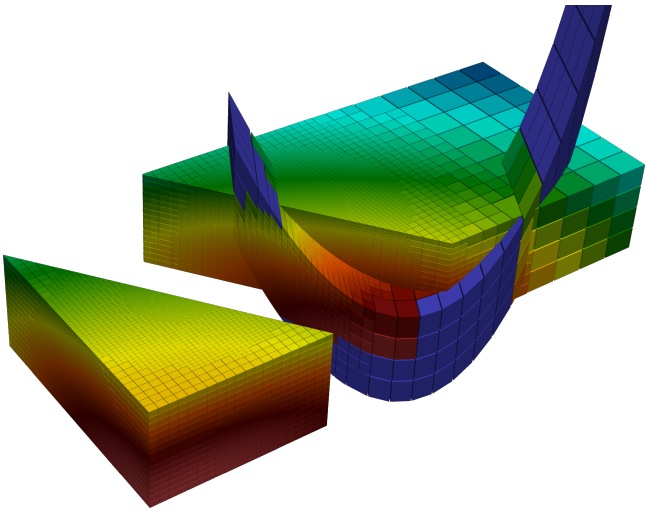

图 3：两个八叉树森林之间的交换。

p4est [3] 和 clawpack 求解器 [6]。

在 MAGIC Forest [10]库中，MAGIC 在 ForestClaw 中实现，从而为其功能增加了可扩展的自适应网格细化能力，并实现了显著的加速。此外，对 ForestClaw 的适配使 MAGIC 能够提供三维挤出和完整三维版本。

在 Trees GEMINI [15], 中，GEMINI 库与 ForestClaw 相结合，因此可以利用其网格细化能力，在已知感兴趣位置周围进行静态细化，并对演化场进行自适应细化。与 MAGIC Forest 类似，它可以创建三维挤出网格和完整三维网格，以及二维网格。

3 MAGIC 与 GEMINI 的耦合

要在单个系统中结合 MAGIC 和 GEMINI，二者需要在重叠区域交换模拟数据，以确保解的一致性。由于两个求解器都依赖彼此无关的并行网格分区，因此在大规模场景下执行数据交换是一个难题。此前，这一问题是通过文件输入输出例程以及后续的根节点—工作节点数据分发来处理的。改用基于 ForestClaw 的 MAGIC 和 GEMINI 后，我们可以采用一种为两个并行网格之间的数据交换而设计的算法，从而显著加快这一过程。

3.1 交换算法。ForestClaw 库采用基于块的自适应网格细化方法，该方法基于 p4est 的八叉树森林自适应网格细化结构 [5] 实现。森林中的每个叶节点对应一个网格块，每个网格块都是由网格单元构成的均匀网格。

我们实现了一种模块化交换算法 [1]，可在八叉树森林和另一种任意结构的网格上运行。八叉树森林为另一网格提供数据。因此，它们分别称为生产者和消费者。消费者网格会创建分布式查询点集合，例如，为网格块中的每个单元生成一个查询。接下来，在分布式八叉树森林网格中搜索这些查询。为此，我们利用 p4est [2] 高效且无需通信的分区搜索例程，将每个查询分配给拥有包含该查询的网格块的进程。根据这些结果，查询会被发送到相应进程，并在其本地分区 [8]中进行搜索。每当在森林的叶网格块中找到查询时，便会为其提供数据。随后，所有查询连同收到的数据一起，通过非阻塞点对点通信返回至其原始进程。

该算法采用不透明点结构，以实现最大的灵活性。因此，并行搜索例程依赖于用户定义的相交回调，用于确定给定查询与给定网格块是否相交。该回调必须考虑应用相关的坐标系。如有需要，回调必须先将查询点和网格块转换到同一坐标系中。由于查询通常表示空间中的单个点，将该点转换到网格块的参考域往往比反向转换更容易。与相交测试类似，叶级的插值也交由用户定义的插值回调处理。

3.2 MAGIC 和 GEMINI 的应用。要在同一个模拟设置中结合 MAGIC 和 GEMINI，GEMINI 必须接收从 MAGIC 的解中插值得到的数据，即中性粒子密度、动量和

版权所有 © 2025 SIAM。未经授权，禁止转载本文。

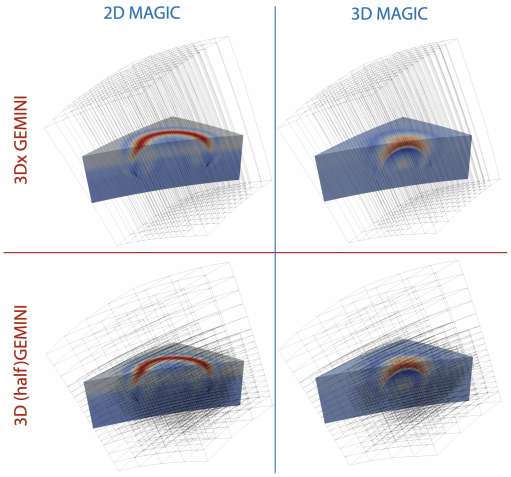

图4：组合耦合维度。

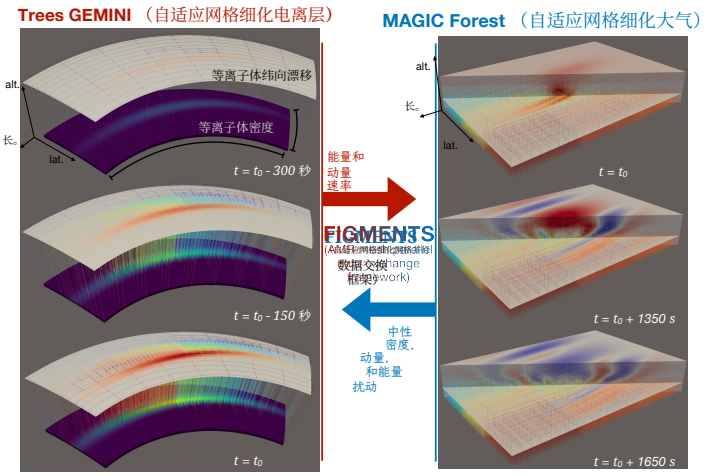

图5：双向网格数据交换。

能量扰动。我们可以使用 ForestClaw 对此交换算法的实现 [4] 。在这里，GEMINI 扮演消费者的角色，而 MAGIC 扮演生产者的角色。

首先，我们遍历 GEMINI网格的所有内存本地补丁，并查询每个补丁中所有网格单元的中心点。查询点直接从 GEMINI 使用的广义正交坐标系转换为 MAGIC 使用的东-北-天（ENU）局部切平面笛卡尔坐标系。对于GEMINI模拟中常用的曲线偶极坐标系 [7], ，该转换通过先转换为地心地固球坐标系（ECEF坐标），再转换为笛卡尔 ECEF坐标来完成，这些转换是中间步骤。

接下来，将查询点输入并行搜索例程。为了识别 MAGIC 森林网格块与 GEMINI 创建的查询点之间的匹配项，我们需要提供一个相交回调。首先，回调将以 MAGIC 物理坐标系表示的查询点转换为给定网格块所属树的参考坐标系。由于 MAGIC 使用映射到单位正方形的局部笛卡尔坐标，这一逆变换过程等同于基于当前所在森林树进行简单的缩放和平移操作。接下来，对映射后的查询点和以参考坐标表示的轴对齐补丁执行实际相交测试。每当查询点与叶级网格块匹配时，就会对所有所需数据执行从补丁单元到查询点的三线性插值。

交换的模块化实现使得在二维、三维或三维挤出MAGIC域中搜索同一组GEMINI查询（见图4）时，只需对相交和插值回调稍作调整。在三维GEMINI域与三维挤出GEMINI域之间切换则更为简单，因为这一更改仅影响查询点的创建。

虽然可行，但无需在两个求解器的每个时间步之后都调用交换例程。相反，两个求解器都可以各自按照时间步进方案计算若干次迭代，直至二者都超过预定的时间阈值。随后执行一次交换，再重新开始这一过程。

3.2.1 双向交换。由于 Trees GEMINI 基于 ForestClaw，与 MAGIC Forest 类似，因此可以在两个网格之间双向交换信息。为此，我们在前文所述的交换例程之后，再调用一次并交换双方的角色。此处，MAGIC 为每个单元中心创建一个查询，并将其转换到 GEMINI 的正交曲线坐标系中。在交换过程中，查询会获得来自 GEMINI 的插值后的能量和动量变化率；见图5。

4 结果

我们在384个核心上执行二维大气重力波模拟。MAGIC针对我们的计时测试以声脉冲进行初始化，该声脉冲被指定为关于原点的轴对称初始条件，用以表示爆炸源的波场（模型所用的其他源包括对流羽流或地震地表运动）。MAGIC大气在半径和高度均为0–400 km的区域内按经验指定；其上覆的GEMINI模型被初始化为从环境中性状态 [12, 17]自洽演化的稳态。来自初始脉冲的波被自适应地追踪，

版权 © 2025 SIAM。未经授权，禁止复制本文。

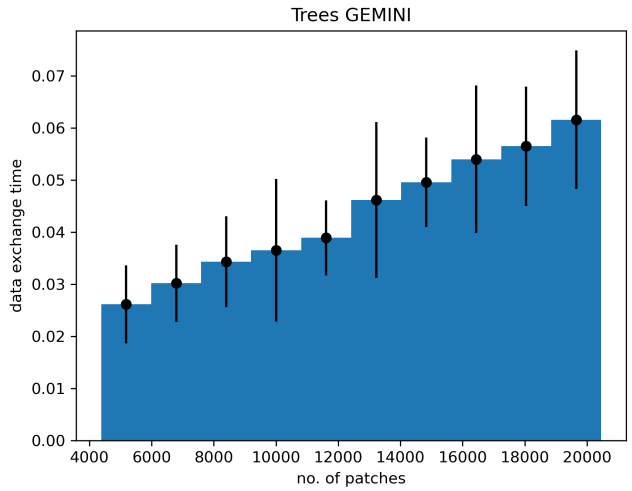

图6：在384个进程上，不同全局 GEMINI 网格块数量对应的交换运行时间（墙上时钟秒数）。

它们在MAGIC的网格中传播，历经10个细化层级（分辨率从<4m到4 km），约在 $t = 300$s时到达GEMINI电离层。在那里，GEMINI的网格进行细化，以~ 10m分辨率追踪MAGIC波场，同时波场不断扩展并耗散。不断演化的瞬态声脉冲提供了一种可行的可扩展性测试，因为它在一次模拟过程中跨越了广泛的尺度范围和网格块数量。MAGIC网格块总数介于33,931到63,064之间，GEMINI网格块数量介于4,376到20,459之间。每个GEMINI网格块的网格单元数（因而查询数）恒定为128。

交换的工作负载在很大程度上取决于需要搜索并为其提供数据的查询数量。这与 GEMINI 网格块数量和平均交换运行时间之间的线性依赖关系相吻合，这种关系可以在图6中观察到。随着网格块总数增加，每个 GEMINI 网格块所耗费的交换时间甚至会减少，这与重叠区域中网格块所占比例最终下降的部分相一致，因为细化中心发生了偏移。此外，还需要考虑交换过程中的负载不均衡，以及每个进程上总体较低的网格块数量。在对其 p4est 实现进行的合成测试中，交换算法展现出了扩展至12,288个内存分布式工作进程的能力 [1]。该算法同时应用于二维和三维测试案例。此外，在对森林进行加权重新分区以应对问题固有的负载不均衡后，可扩展性得到了显著改善。

除了算法的可扩展性之外，总运行时间也值得关注。每次交换平均耗时 0.04 秒，而 MAGIC 的平均时间步耗时 0.83 秒，GEMINI 的平均时间步耗时 0.71 秒。由于无需在每个时间步之后都同步两个求解器，因此交换对总运行时间的影响还可以进一步降低。在整个模拟过程中，两次同步之间平均有 19 个 MAGIC 时间步和 27 个 GEMINI 时间步。

5 结论

我们将一种可扩展的交换算法应用于基于 ForestClaw 的 MAGIC 和 GEMINI 库版本之间的网格耦合，该算法采用八叉树森林。所得方法能够对两个网格中的数据进行插值，并处理维度不同的网格。在一次 AGW模拟 中，该方法展现出良好的可扩展性，且运行时间开销可以忽略不计。

致谢

作者衷心感谢通过与安柏瑞德航空大学签订的分包合同，由 DARPA合作协议HR00112120003 提供的部分资助。本研究已获准公开发布；发行不受限制。本文件中的信息不一定反映美国政府的立场或政策。

我们感谢波恩大学豪斯多夫数学中心（HCM）下属的波恩国际数学研究生院（BIGS）提供的额外资助。HCM 由德国研究联合会（DFG）通过德国卓越计划 EXC 59 – 241002279（“数学：基础、模型、应用”）资助。我们还感谢 DFG 提供的资助，项目编号为 467255783（“混合自适应网格细化模拟”）。

我们还要感谢波恩大学提供的“Bonna”和“Marvin”计算集群的使用权限。

参考文献

[1] H. Brandt and C. Burstedde、 *Scalable overset computation between a forest-of-octrees- and an arbitrary distributed parallel mesh*，2026年。预印本，https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.00760。[2] C. Burstedde、 *Parallel tree algorithms for AMRand non-standard data access*，《ACM数学软件汇刊》，46（2020），第1–31页。[3] C. Burstedde、 L. C. Wilcox、 and O. Ghattas, p4est*: Scalable algorithms for parallel adaptive mesh refinement on forests of octrees*，《SIAM科学计算期刊》，33（2011），第1103–1133页。[4] D. Calhoun、 *ForestClaw: A parallel, adaptive libraryfor logically Cartesian, mapped, multiblock domains*，2025年。https://forestclaw.org/ForestClaw/index.html（最后访问于2025年12月21日）。

版权所有 © 2025 SIAM。未经授权，禁止复制本文。

[5] D. Calhoun and C. Burstedde、 *ForestClaw: A parallel finite volume solver for adaptively refined Cartesian multiblock domains* 2017 。手稿，。

[6] Clawpack Development Team、 *Clawpack software*，2025年5月13日1。版本。。[7] J. D. Huba、 G. Joyce、 and J. A. Fedder、 *Sami2is another model of the ionosphere (SAMI2): A new low-latitude ionosphere model*，《地球物理研究杂志：空间物理》，105（2000），第23035–23053页。[8] T. Isaac、 C. Burstedde、 L. C. Wilcox、 and O. Ghattas 、 *Recursive algorithms for distributedforests of octrees*，《SIAM科学计算期刊》，37（2015），第C497–C531页。[9] J. B. Snively、 *Mesospheric hydroxyl airglow signatures of acoustic and gravity waves generated by transient tropospheric forcing*，《地球物理研究快报》，40（2013），第4533–4537页。[10] J. B. Snively and D. Calhoun、 *Scalable modeling of acoustic-gravity wave interactions coupling and observables from surface to space* 21 2021年。[11] J. B. Snively、 D. Calhoun、 S. Aiton、 C. Burstedde H. Brandt T. Griesbach , , , B. Pineyro P. Inchin R. Sabatini M. Hirsch , , , , and M. D. Zettergren 、 *Scalable modeling of infrasound propagation from transient sources in surface-to-exobase domains* 24 。AGU年会，2024年。[12] J. B. Snively、 D. Calhoun、 S. Aiton、 C. Burstedde H. Brandt T. Griesbach , , , B. Pineyro S. Mesfin J. A. Guerrero C. J. , , , , , , , , Heale P. Inchin R. Sabatini M. Hirsch and M. D. Zettergren 、 *Scalable modeling of acoustic-gravity wave propagation and evolutions from impulsive sources* 25 2025 。AGU年会，。

[13] J. B. Snively、 D. Calhoun、 S. Aiton、 C. Burstedde H. Brandt M. Hirsch J. A. , , , , , , , , Guerrero C. J. Heale P. Inchin S. Mesfin B. Pineyro R. Sabatini and M. D. Zettergren , , *Scalable modeling of acoustic-gravity wave processes in the ionosphere thermosphere and mesosphere (ITM)* , , 。AGU23秋季会议，2023年。[14] J. L. Steger、 F. C. Dougherty、 and J. A. Benek、 *A chimera grid scheme* ，K.N. Ghia、U. Chia（编），《网格生成进展》，ASME FED，5（1983），第59–69页。[15] M. Zettergren、 M. Hirsch J. Snively D. Calhoun C. Burstedde S. Aiton H. Brandt T. Griesbach K. Deshpande P. Vaggu J. Van Israel and K. Lynch *GEMINI: Geospace Environment Model of Ion-Neutral Interactions* 2024 , , , , , , , , 。CCMC研讨会，2024年。[16] M. D. Zettergren、 *GEMINI: Geospace Environment Model of Ion-Neutral Interactions* 3 。gemini D GitHub页面，2025年。[17] M. D. Zettergren、 D. Calhoun、 J. B. Snively、C. Burstedde H. Brandt P. Inchin M. Hirsch , , , , T. Griesbach S. Aiton and K. Deshpande *Numerical modeling of ionospheric responses to ground-level* 25 , *anthropogenic sources*。AGU 2025 年年会。

[18] M. D. Zettergren and J. B. Snively, *Ionospheric response to infrasonic-acoustic waves generated by nat-ural hazard events*，《地球物理研究杂志：空间物理》，120（2015），第 8002–8024 页。

版权所有 © 2025 SIAM。未经授权，禁止转载本文。