

## 《地球流体动力学中波动方程的数值方法》评介

丁汇 赵南 周江兴

(国家气候中心, 北京, 100081)

数值天气预报和气候模拟与预测的迅速发展对计算机技术提出愈来愈高的需求, 目前千亿次与万亿次的巨型计算机已经问世, 并在实际中得到应用。另一方面, 数值模拟与预测的发展也明显地依赖于计算流体力学和数值计算方法的进展, 因为它们可以为高分辨率的复杂数值模式的计算以及长期积分提供更准确、更有效的数值计算理论与方案。因而, 这个领域以及相关领域的科学工作者也十分需要通过一部好书籍来关注与了解数值计算方法的进展。

对一本数值方法的专著而言, 它必须对于理论方面具有一定的高度的把握, 同时对于具体的数值方法要有深入细致的讨论, 使读者既能理解数值方法的理论深度又能在实际中加以应用。这些依赖于作者的在这一领域的学识水平和计算实践。不仅如此, 其内容编排及对问题的阐述方式能否使读者感到其清晰的思路也是作者学术造诣的直接体现。至少从这个意义上讲, 华盛顿大学 Dale R. Durran 教授所著《地球流体动力学中波动方程的数值方法》(英文原名 Numerical Methods for Wave Equations in Geophysical Fluid Dynamics, Springer, 1998) 一书是一本值得推荐的佳作。该书是由著名的 Springer 出版社新近出版的一套应用数学教科书中的第 32 册, 尽管作者本人为气象学家, 但就该书的内容而言并不限于地球流体力学领域, 它也不失为一本计算流体力学或应用偏微分方程计算方法方面的优秀参考书目。理应受到气象、海洋、物理、力学及工程界的读者的重视。

作为一部优秀的教科书, 该书对计算地球流体力学领域迄今为止理论与应用方面的主要研究成果进行了广泛而深入的论述。较之其它同类书籍, 其全面性、理论性及应用性使之堪称为该领域的一部经典之作。其独到之处似乎也可以主要地从下述三个方面进行归纳:

首先, 该书内容丰富、系统全面。全书用了八章的篇幅对不同的专题进行了详尽的讨论, 它们是 1) 引言; 2) 基本有限差分方法; 3) 单向波动方程补遗; 4) 级数展开法; 5) 有限体积法; 6) 半拉格朗日方法; 7) 无物理意义的快波; 8) 无反射边界条件。其内容几乎涵盖了该领域目前所有的数值方法。问题的对象既侧重于地球流体问题同时也兼顾一般性的论述及在其他领域中的应用。以第四章为例, 仅在“级数展开法”这一题目下, 就系统深入地论

述了谱方法、伪谱方法和有限元方法这些在大气科学及其它工程领域中常用的方法。再例如在第二章有关时间差分方案的部分中,广泛涉及到各种 1 级单步法、多级法、多步法,并较为详细地讨论了一些高阶方法如 3 阶 Runge-Kutta 法和 Adams-Bashforth 法等。类似的一些高阶方法多用于常微分方程的数值积分,而在用于偏微分方程的数值积分时由于空间差分误差的掩盖使其不仅不能发挥效应还使得计算量大大地增加。故很少用于地球流体问题的计算。但作者出于对一本数值方法教科书的完整性和系统性的考虑,使用较大的篇幅讨论这些内容。这对于拓宽读者的视野不无好处。此外,书中每章后面都附有大量精心设计的练习题使得该书的内容更加丰富并适合做为教科书使用。

其次,相对于其它同类书籍而言,作者善于在一定的高度上阐述问题。长期埋头于繁琐的数值计算容易使人迷失在各种具体的方案中,避免这种情况出现的办法就是站在适当的高度上去看问题的来龙去脉。由于地球流体系统中纯粹的动力过程主要表现为各种类似于波的行为,刻画后者的偏微分方程也多为双曲型方程。做为全书的理论基础,作者在第一章当中首先介绍了双曲型方程(组)的定义、性质和分类,并侧重于讨论了与波的传播行为相关的特征线理论。尽管如此,在紧接下来的对地球流体波动方程的讨论中,作者强调了相反的情形以深化读者对上述概念的理解。如浅水波方程及描述绝热无粘性可压缩流的 Euler 方程的为双曲型,但其波动的传播并非沿特征线进行。一些滤去声波的滤波方程(如 Boussinesq 近似)尽管可以很好地近似描述重力波和 Rossby 波等却已不再为双曲型等。在各个章节中专题讨论中也保持这一风格。如在第四章中做为一个统一的基础首先引入一般的级数展开法,其后相应于余差的不同约束形式及不同的性质的展开函数系逐步衍生出各种具体方法。如当要求余差与展开函数正交时为 Galerkin 方法。对于这一方法,当进一步要求展开函数也为正交函数系时是所谓的谱方法,而展开函数为仅在一个较小的域中不为零的函数系时即是有限元方法了。如果对余差的约束为要求它在离散格点上取零值,就是所谓的伪谱方法。再例如第五章在引入有限体积法的讨论中,将其提高到偏微分方程的弱解的数值计算的高度加以认识。书中指出,通常一些空间非连续解(常由非线性导致,如冲击波等)无法满足微分方程,但满足该微分方程的积分形式的守恒律。此时称这些解为该微分方程的弱解。显然,不能期望由该微分方程直接差分来计算其弱解。但是可以在每个格子的小体元上近似写出积分形式的守恒律,由此构造出能计算弱解的差分方案。这就是有限体积方法。

最后,数值方法问题是具体而繁杂的。因而较为难能可贵的是作者对于各种具体的数值方法及其在气象领域当中的应用这些实质性内容的讨论非常细致和详尽。全书的各个章节中涉及到大量的具体数值方法或方案,其对象从一维平流方程到原始方程,作者均一一予以详细讨论。如第七章“无物理意义的快波”中对抑制快波(声波)的不稳定增长的数值技术进行的讨论就是一个很好的例子。它包括了将连续性方程简化为不可压缩、Boussinesq 等近似,直接从方程中滤去声波的投影方法、对产生快波的压力梯度项使用时间隐式差分的所谓半隐式方法、利用算子可分离的性质对快波过程和慢波过程分别积分的分步方法等。每一种方法从原理到对具体的差分方案的分析都极为详尽。如其中对半隐式方法讨论中分别通过对一个原型问题、浅水波方程、Euler 方程等的半隐式差分方案的稳定性分析详细揭示出这一方法对快波不稳定的抑制作用。再例如有关谱方法的讨

论其技术细节之详尽完全可以作为这方面的使用手册。

对于气象领域的读者需要指出的是,该书所涉及的内容仅为所谓的“动力框架”,而数值模式的另外两项重要内容即“物理过程”与“初始化”问题,尽管有时显得更加重要,并非本书讨论的范围。虽然如此,相信该书对我国气象工作者的业务水平提高会起到一定积极作用。

## 《气象学报》进入 SA 等检索系统

当前最具有权威性的国际 6 大检索系统有: SCI, EI, CA, SA, 苏联文摘杂志和日本科技文献速报。根据中国科技论文与分析数据库(CSTPC) 1998 年 10 月提供的“期刊检索报告”得知,中国气象学会主办的《气象学报》中文版被英国的《科学文摘》(SA)和日本科技文献速报两大检索系统收录。