

偏微分方程的有限差分方法

〔美〕G. E. 福雪斯 W. R. 华沙著 胡祖炘 吴文达 陈永和译

上海科学技术出版社

偏微分方程的有限差分方法

〔美〕 G. E. 福雪斯 著
W. R. 华沙

胡祖炘 吴文达 陈永和 译

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书讨论用有限差分方法解偏微分方程的问题。全面地综述了最基本的理论材料,诸如构造差分方程的方法,差分方程的解法,差分方程的解收敛于微分方程的解的条件,误差估计,差分格式的稳定性等等。另一方面,本书也很注意实际的材料,提供了不少实验性的数据,并有专门的一节讨论在电子计算机上实现的问题。对于一系列的问题,作者们还表示了他们自己的意见。

本书适用于计算数学方面的工作者,教师,研究生和大学生,以及其他领域内有兴趣于用计算机解偏微分方程的读者阅读和参考。

FINITE-DIFFERENCE METHODS FOR PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS

George E. Forsythe

Wolfgang R. Wasow

John Wiley & Sons, Inc., 1960

偏微分方程的有限差分方法

胡祖炽 吴文达 陈永和 译

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 15.5 字数 383,000

1964 年 6 月第 1 版 1979 年 3 月第 2 次印刷

印数 5,001—38,000

书号: 13119·554 定价: 2.30 元

序 言

随着近年来高速計算技术的惊人发展，数值分析这門数学科学有了极为本质性的成长。要把这門学科的一切重要方面均衡地写在一本书內已不再可能。事实上，这个理論的一些分支，特别是微分方程的数值解方面，实在已够写几本专著的了。

解偏微分方程有許多数值方法。这些方法之中，只有一种是可以同样应用于綫性問題和非綫性問題的，这就是有限差分法。我們只限于研究这个方法。有关偏微分方程差分方法的文献正在飞速增长。它們分布很广，而且在观点和特点方面也有很大区别。要对这一領域作明确的叙述，必須等到目前这个强烈发展的阶段至少进入暂时停頓的时候才能做。在目前，我們相信把許多現在有用的較重要的結果和方法作一个有联系的叙述是有用的。

在选择主要材料和叙述的深广度方面，我們試圖保持在中等水平。本书的絕大部分对于牢固地掌握了质量較好的高等微积分课程中通常讲授的知識和一些矩陣理論的讀者应当能够理解。沒有这个預备知識，对于偏微分方程的任何方面，即使是最初等的方面都不可能有真正的理解。另一方面，我們并不假定讀者事先具有偏微分方程理論的知識，因为这将严重地限制本书的用处。我們把一些与数值分析沒有直接关系的課題，例如在有限差分近似基础上的存在性和唯一性的証明等剔除了。在另一极端，我們很少企图使本书成为程序設計者的指南或包含許多的数值例子。求偏微分方程的数值解并不是一件容易的事。从物理科学中产生的每一个問題几乎都要有新的想法，都要对已有的方法进行修改。理論背景和已知方法的一般知識对于这些問題的研究几乎是不可

缺少的,这些正是我們在本书中試图介紹的.

除了少数例外,求相应于偏微分方程的差分方程的数值解是一件龐大得只能在自动数字計算机上完成的工作.对于使用这些机器經驗还不多的讀者,§3提供了有关的一些一般背景.在§25中,我們比較詳細地討論了在自动計算机上得到差分方程和求解的某些算法.

本书是以我們在 California 大学为研究生討論班所准备的讲稿为基础写成的,适用于下述几类讀者:(i)純粹数学家与应用数学家;(ii)自动数字計算机的程序設計者;(iii)工程师、物理学家、气象学家和其他对用机器解偏微分方程感兴趣的人;(iv)上述几个領域的研究生.虽然本书不是作为教科书而写的,但曾在我們目前工作的大学里用本书的原稿对研究生讲授过.

George E. Forsythe 于 Stanford 大学

Wolfgang R. Wasow 于 Wisconsin 大学

1959 年 12 月 10 日

目 录

序 言

偏微分方程与计算机介绍	1
-------------------	---

§1 有关偏微分方程分类的注记	1
§2 方程组和单个方程	7
§3 数字计算系统的性质	8
3.1 台式计算	8
3.2 穿孔卡片计算机	10
3.3 自动数字计算机	10
3.4 偏微分方程提出的要求	13

1. 二个自变量的双曲型方程	16
----------------------	----

§4 方程 $u_{tt} - u_{xx} = 0$ 的有限差分近似	16
4.1 $u_{tt} - u_{xx} = 0$ 的最简单初值问题的解	16
4.2 一个近似的差分方程	17
4.3 $\lambda \leq 1$ 时差分方程的显式解	20
4.4 用有限 Fourier 级数表示差分方程的解	25
4.5 向微分问题的解的收敛性	26
4.6 稳定性	28
§5 稳定性概念的进一步说明	31
5.1 定义与简单的例子	31
5.2 对波动方程的应用	38
§6 双曲型微分方程组及其特征线	41
6.1 正规形式	41
6.2 例	44
6.3 $n=2$ 时的典型微分方程组	46
6.4 关于初值问题的注	48

§7	拟綫性双曲型方程組的有限差分方法	53
7.1	方法的叙述	53
7.2	証明差分近似收斂性的一个一般方法	58
7.3	双曲型組的差分格式的收斂性	62
7.4	在曲綫网內的差分	66
7.5	舍入誤差	68
§8	沿特征綫的积分法	69
8.1	Massau 方法	69
8.2	二阶的拟綫性方程	71
8.3	对于 n 个因变数的另一积分方法	72
§9	用 Adams 方法的积分法	74
§10	激波	78
10.1	激波的概念	78
10.2	含有激波的問題的数值解	80
10.3	用模拟的粘性項来計算激波波陣面	84
10.4	粘滯流的眞实方程的积分法	89
10.5	Lax 的差分方法	92
2.	抛物型方程	95
§11	最簡單的热流动問題	95
11.1	緒言	95
11.2	初值問題的解	96
§12	最簡單的有限差分近似	99
12.1	稳定性条件	99
12.2	收斂性与离散化誤差	103
§13	在有限区間內的綫性問題	107
13.1	微分問題	107
13.2	一个有限差分近似	108
13.3	一个隱式方法	110
13.4	隱式差分方程的解	112
13.5	隱式方法的收斂性	114
§14	更一般的二个变数的綫性抛物型問題:显式方法	117
14.1	显式的形式差分近似	117

14.2	用迭加法解非齐次綫性差分問題	118
14.3	正型差分式的有界性与稳定性	121
14.4	John 的有界性条件	124
§ 15	綫性問題的其他显式与隱式方法	130
15.1	对隱式方法的一个更一般的处理	130
15.2	用二条以上格綫的显式方法	136
15.3	高阶的問題	143
§ 16	收斂性的其他定义, Lax 与 Richtmyer 的理論	146
16.1	关于泛函分析的注記	146
16.2	在 Lax 与 Richtmyer 意义下的收斂性与稳定性	147
§ 17	非綫性問題	150
17.1	半綫性方程	150
17.2	其他拋物型問題的例子	152
3.	橢圓型方程	160
§ 18	含有橢圓型偏微分方程的一些数值問題	160
18.1	一般的 Laplace 边值問題	161
18.2	排水問題	162
18.3	石油流动問題	164
18.4	应力問題	167
18.5	边界层問題	168
18.6	薄膜的特征值問題	169
18.7	簡單的核反应堆問題	170
18.8	双調和特征值問題	172
18.9	Plateau 問題	172
18.10	波动方程的特征值問題	173
§ 19	从橢圓型偏微分方程論中选取的結果	173
19.1	变分公式	174
19.2	某些特征值問題的变分公式	180
19.3	自伴性	182
19.4	交接面条件	186
19.5	最大模原理	190
§ 20	橢圓型差分方程問題的形成	191

20.1	离散化及由此产生的問題	191
20.2	直綫法	194
20.3	要离散化的問題的类型	195
20.4	不規則网格	195
20.5	建立差分方程的变分方法	199
20.6	正方形网格: 导数的逼近	202
20.7	正方形网格: $L(u)$ 和 Δu 的逼近	208
20.8	应用变分方法于核扩散方程	215
20.9	Dirichlet 边值条件的处理	218
20.10	法向导数边值条件	222
20.11	奇点和自由边界	224
§ 21	解橢圓型差分方程的古典理論	225
21.1	差分方程作为矩陣方程	225
21.2	消去法	229
21.3	迭代法	235
21.4	同时位移法; 斜量法	242
21.5	Richardson 方法	249
21.6	逐个位移法	259
21.7	Gauss-Southwell 松弛	266
§ 22	显式和隱式超松弛法	268
22.1	逐个超松弛法的 Young-Frankel 理論	268
22.2	沒有性质(A)的超松弛	287
22.3	隱式方法: 綫超松弛	295
22.4	隱式交替方向法	300
22.5	正方形区域收敛速度的总结	313
§ 23	离散化和舍入誤差	314
23.1	Gerschgorin 方法	314
23.2	一个带有 Stieltjes 核的积分方程	320
23.3	积分方程的解的一个估計	327
23.4	离散化誤差的估計	329
23.5	关于綫性 Dirichlet 問題的离散化誤差的某些进一步結果摘要	340
23.6	离散的 Dirichlet 問題的 Green 函数	348

23.7	关于 Neumann 問題和第三边值問題的离散化誤差	353
23.8	解 Dirichlet 差分問題中的舍入誤差	354
23.9	舍入誤差的概率估計	361
§ 24	薄膜的特征值問題	365
24.1	引言	365
24.2	用差分方法得到的上界	367
24.3	标准 L 形薄膜	371
24.4	用差分方程得到的下界: Weinberger 方法	373
24.5	用差分方程得到的漸近下界	377
24.6	定理 24.7 的証明	382
24.7	用 L 形薄膜的試驗	391
24.8	有限特征值問題的数值解法	393
§ 25	在自动数字計算机上解橢圓型偏差分方程	398
25.1	在数字計算机上得到方程	398
25.2	当 C 为曲綫时得到差分方程	402
25.3	一个求积的服务性程序的計劃	405
25.4	等級网格的使用	406
25.5	逐个超松弛: ω 的估計	410
25.6	逐个超松弛: 需要的时间	416
25.7	解差分方程的其他方法	418
25.8	在計算机上解特征值問題	419
25.9	在計算机上解 Neumann 問題	420
4.	含多于两个自变量的初值問題	421
§ 26	波动方程	421
26.1	微分方程	421
26.2	最簡單的差分近似	424
§ 27	多維情形的特征	426
§ 28	一个气象預报問題	429
28.1	直接从原始方程組預报	431
28.2	預报方法的修改	432
28.3	一維模型	434
28.4	二維模型	436

28.5 “逆风”差分方程.....	442
28.6 三个空間維.....	445
§ 29 关于差分方程和微分方程的 Fourier 方法的一般討論	445
29.1 問題.....	445
29.2 用 Fourier 級数求显式解.....	449
29.3 $U(x, t)$ 向 $u(x, t)$ 的收斂性	451
29.4 稳定性.....	454
29.5 怎样檢驗稳定性和收斂性.....	455
§ 30 Peaceman-Rachford 方法	458
30.1 一般的描述.....	458
30.2 对二維热流方程的应用.....	459
参考文献	461
索 引	479

偏微分方程与计算机介绍

§1 有关偏微分方程分类的注记

作为最初的出发点,我们考虑三个微分方程

$$u_{xx} + u_{yy} = 0, \quad (1.1)$$

$$u_{xx} - u_{yy} = 0, \quad (1.2)$$

$$u_{xx} - u_y = 0. \quad (1.3)$$

(下标表示求偏导数.)它们是在数学的物理应用中遇到的许多重要的偏微分方程的几个模型.

和在常微分方程论中一样,我们可以求这种偏微分方程的“通”解,但是可以求到通解的情形比常微分方程中还要少些,而且即使求到了,对于回答数学物理学家认为重要的问题也是很少有帮助的. 在应用中,我们通常要求一个解,它除了满足微分方程之外还要满足某些附加的要求,例如边值条件或初值条件等. 对于线性常微分方程,所求的解常常可以通过适当地确定通解中的任意常数来求得(但对于非线性方程一般则不能如此). 对于偏微分方程,这只是一些例外情形才是可能的,其原因之一是现在的通解包含任意函数而不是任意常数.

最后所说的这一点可用方程(1.1)来说明. 这个方程,即所谓 Laplace 方程,通常记作 $\nabla^2 u = 0$ 或 $\Delta u = 0$, 和解析函数理论有着密切的关系. 令 $z = x + iy$, 并设

$$f(z) = u(x, y) + iv(x, y)$$

是 z 的解析函数. 此时 u, v 就由 Cauchy-Riemann 微分方程

$$u_x - v_y = 0, \quad u_y + v_x = 0 \quad (1.4)$$

所联系, 而且它们具有任何阶的偏导数 (参看 Knopp [1945] 第 28~30 页). 如果把 (1.4) 的第一个方程对 x 微分, 而把第二个方程对 y 微分, 就知道

$$u(x, y) = \operatorname{Re} f(z) \quad (1.5)$$

是 Laplace 方程的一个解. 反之, 我们现在来证明 Laplace 方程的任何一个解必是某个解析函数的实部. 假设给定了一个解 u , 那末可以从方程组 (1.4) 解出 v , 因为这两个方程的相容性条件正好就是 u 的 Laplace 方程. 于是 $u(x, y) + iv(x, y)$ 就是复变量 $z = x + iy$ 的一个解析函数 $f(z)$ (参看 Knopp [1945] 第 30 页), 也就是说 (1.5) 成立. 所以 (1.5) 是 (1.1) 的通解.

Laplace 方程的解通常叫做调和函数 (或势函数), 而由 Cauchy-Riemann 方程 (1.4) 所联系的两个调和函数叫做是相互共轭的.

方程 (1.2) 的通解也可以无困难地算出来, 因为如果 u_{xx} 和 u_{yy} 都连续, 则作变量的变换

$$\xi = x + y, \quad \eta = x - y, \quad u(x, y) = \omega(\xi, \eta),$$

就把 (1.2) 变成

$$\omega_{\xi\eta} = 0,$$

这方程的解是

$$\omega = F(\xi) + G(\eta),$$

其中 F 与 G 都是任意的可微函数; 如果我们要求 $\omega_{\xi\eta} = \omega_{\eta\xi}$, 那就沒有别的解了. 所以

$$u(x, y) = F(x + y) + G(x - y) \quad (1.6)$$

是 (1.2) 的解, 这里只要 F 与 G 都是两次可微函数, 此外则是任意的 [要使 (1.6) 是一个解, F 与 G 的二阶导数甚至不必是连续的, 把 (1.6) 代入 (1.2) 即可得到证明].

在一个数学物理問題中，对微分方程的解附加的条件随問題的性质而有所不同。下面給出一些极为簡單但又是典型的例子。

(a) 考虑一条剛性的金属綫，它在 (x, y) 平面上的正投影是一条簡單封閉曲綫 C 。在这个框架上張以一个在均匀張力作用下的密度均匀的理想彈性膜。以 $u(x, y)$ 表示这膜对 (x, y) 平面的偏离。假定 u 及其导数都很小，使得 u, u_x, u_y 的高次幂可以忽略不計，則可証明 u 在 C 的内部 R 內是一个調和函数。当然， u 在边界 C 上的值就是預先給定的金属綫框架的偏离 f 。所以 u 是問題

$$\Delta u = 0 \quad \text{在 } R \text{ 內}, \quad u = f \quad \text{在 } C \text{ 上} \quad (1.7)$$

的解(参看 Courant-Hilbert [1953] 第 247 頁)。这一問題通常叫做 Laplace 方程的 Dirichlet 問題。对于这个問題和其他問題，应当記住，除非 f 是很光滑的函数，否則不能希望解在边界点上会有二阶导数，更談不上在边界上滿足微分方程。我們說 u 取事先給定的边值是指 $u(x, y)$ 当点 (x, y) 从內部趋于边界时趋于这些值。

(b) 一根直而細长的棒作纵向彈性振动。經過数学上的理想化，設棒由 x 軸表示，并以 $u(x, t)$ 表示在靜止状态具有横坐标 x 的点在时刻 t 对其靜止位置的偏离。如果 $u(x, t)$ 很小，在适当地選擇单位后， u 就是微分方程 $u_{tt} - u_{xx} = 0$ 的解。这个微分方程是波的傳播的微分方程的最簡單形式 (Sokolnikoff 与 Sokolnikoff [1941] 第 367 頁)。基于物理学的理由，我們希望 u 在任何时刻的值，当初始偏离 $u(x, 0)$ 及初始速度 $u_t(x, 0)$ 事先給定后将是唯一确定的。这样就导出了在 $t > 0$ 求 $u(x, t)$ ，使

$$\begin{aligned} u_{tt} - u_{xx} &= 0 \quad \text{当 } t > 0 \text{ 时;} \\ u(x, 0) &= f(x); \quad u_t(x, 0) = g(x) \end{aligned} \quad (1.8)$$

的問題，其中 $f(x), g(x)$ 除了可能要滿足某些光滑性要求外 (这些要求現在不准备討論)，是事先任意給定的。这是初值問題的一个例子。初值問題有时也叫做 Cauchy 問題。

(c) 再考虑一根細直的无限长的棒。但是这一次用 u 表示它

的温度,而研究 u 与 x, t 的依赖关系. 我们假定棒是绝热的,并且已知温度的初始分布 $u(x, 0)$. 于是以后的温度分布 $u(x, t)$ 就唯一地确定了,这从物理上看来是合理的. 容易证明,只要适当地定义变量的单位,那末在理想的情况下,棒中热流的微分方程是 $u_t - u_{xx} = 0$ (参看 Churchill [1944] 第 15 页起). 于此,自然的初值问题就是

$$u_t - u_{xx} = 0 \text{ 当 } t > 0 \text{ 时; } u(x, 0) = f(x).$$

在线性常微分方程论中,一个给定的方程通常可以按不同的方式和附加条件相结合,这些附加条件可以是在一个点,两个点或更多的点上预先给定的数据. 在一定的相当广泛的范围内,只要条件的数目和微分方程的阶数相同,这种问题一般会有唯一的解. 对于偏微分方程,这一点不再成立,这个事实具有本质的重要性. Hadamard ([1923] 第 23~24 页) 曾经着重指出并说明了这一点.

他证明了,例如, Laplace 方程的 Cauchy 问题

$$\Delta u = 0 \text{ 当 } y > 0 \text{ 时, } u(x, 0) = f(x), \quad u_y(x, 0) = g(x), \quad (1.9)$$

在一定意义下不是适定的. 例如,考虑特殊情况 $f(x) \equiv 0$, 并假定 $u(x, y)$ 是 (1.9) 在某个以 x 轴的一段为下界的区域内的解. 这时可以利用关于调和函数的两条标准定理,第一条是说: 调和函数 $u(x, y)$ 是变量 x 或 y 的任何一个的解析函数 (Sommerfeld [1949] 第 47~48 页). 第二条是关于解析函数反射原理的一个简单推论 (Nehari [1952] 第 183~187 页). 它告诉我们: 一个函数,如果它在一个以直线段为部分边界的区域内是调和的,而在这条直线段上为零,则可调和开拓到这线段上和这线段的外面. 由于调和函数的导数仍是调和函数,从这两个事实便可推出,当 $y=0$ 时, $u_y(x, y)$ 是 x 的解析函数,这就是说, $g(x)$ 必须是解析的. 换言之,除非已知函数 $g(x)$ 属于非常特殊的函数类,即解析函数类,否则 $f(x) \equiv 0$ 的问题 (1.9) 就没有解. 容易证明,如果 $f(x)$ 不事先规定

为恒等于 0, 要(1.9)有解也必須 $f(x)$ 是解析的. 但是我們不在这里証明了.

在初始值的可以容許的選擇中, 这个很严的限制乍一看来会认为是不严重的. 因为大家知道, 根据 Weierstrass 逼近定理, 任何連續函数都可以用解析函数(甚至用多項式)逼近至任意的程度 (Courant 与 Hilbert [1953] 第 65 頁起). 如果边界值的良好逼近一定导致 $y > 0$ 时解的良好逼近, 那末这一論点将是正确的. 但是, 对于現在这个問題, 正好不是这个情形. 作为反例, 只須考虑初值

$$f(x) = e^{-\sqrt{n}} \sin nx, \quad g(x) = 0,$$

其中 n 是正整数. 容易驗証

$$u(x, y) = e^{-\sqrt{n}} \cosh ny \sin nx$$

是具有这些初值的調和函数. 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 初值及其一切导数均趋于 0, 然而 $u(x, y)$ 当 $y \neq 0$ 时迅速地发散.

按 Hadamard 所說, 对于初始数据的不連續依賴性, 使得問題(1.9)不具有任何物理意义, 因为物理数据按其性质來說都只是近似的. 更一般地說, Hadamard 把一个数学物理問題称为适定的, 如果它的解存在、唯一、并且連續地依賴于数据. 可以証明, 問題(a), (b), (c)都是适定的. 如果发现一个具有物理来源的数学問題不是适定的, 这通常表明它的叙述是不正确或不完全的.

把問題(a), (b), (c)的附加条件互換得出的問題都不是适定的. 作为第二个不适定的例子, 考虑附加条件的一个这种互換. 設

$$u_{xx} - u_{yy} = 0 \text{ 在 } R \text{ 內, } u = f \text{ 在 } C \text{ 上,} \quad (1.10)$$

其中 R 是一个长方形, 它的边的斜率为 ± 1 . 仍用变换 $\xi = x + y$, $\eta = x - y$, 微分方程便变成 $\omega_{\xi\eta} = 0$, 而长方形 R 变成边平行于 ξ 軸和 η 軸的长方形 R^* . 假定(1.10)有解. 由于 ω_{ξ} 不依賴于 η , 而

ω_η 也不依赖于 ξ , 所以边界值函数 f 的切向导数在边界长方形相对边的对应点上必须具有相同的值. 换言之, 对于任意的 f , 即使加上很严的光滑性限制, 问题 (1.10) 也没有解.

偏微分方程可以根据附加条件的类型来进行分类, 这些附加条件是使问题成为适定所必需的. 对于含两个自变量的二阶线性微分方程, 这种分类是容易描述的. 这种类型的最一般的微分方程是

$$Au_{xx} + 2Bu_{xy} + Cu_{yy} + Du_x + Eu_y + Fu + G = 0, \quad (1.11)$$

其中的系数都是 x, y 的函数. 根据行列式

$$\begin{vmatrix} A & B \\ B & C \end{vmatrix}$$

是正的、负的、或零而称 (1.11) 是椭圆型的、双曲型的或抛物型的. 这种分类一般取决于所考虑的 (x, y) 平面上的区域. 例如, $xu_{xx} + u_{yy} = 0$ 这个微分方程当 $x > 0$ 时是椭圆型的; 当 $x < 0$ 时是双曲型的; 而当 $x = 0$ 时则是抛物型的.

本节所讨论的三个简单方程的每一个是这三种类型之一的例子: Laplace 方程是椭圆型的; 波动方程是双曲型的; 热流动方程是抛物型的. 可以证明, 我们在每个情形所附加的条件和相应类型的较一般的微分方程结合起来会得到适定的问题, 但和任何其他类型的微分方程结合起来则不然.

对于含两个以上变量的微分方程, 以及对于方程组和非线性微分方程也能给出关于椭圆型、双曲型、和抛物型的概念的有用定义. 我们将在需要时再行介绍.

最近, Hadamard 关于只有适定问题才有物理意义的见解曾经被一些数学家怀疑过. 对具有物理来源的椭圆型方程的某些初值问题, 提出了应该逼近准确解的数值计算格式, 虽然这准确解是以不连续的方式依赖于初始值的. 然而这些研究还远不完整, 不能在这里加以描述.