有限元第二次编程作业

W Huang

日期：2023 年 11 月 26 日

1 编程第一题

1.1 求解设置

求解 PDE

$$\begin{cases} -u'' = f, \quad \text{in } \Omega = (0,1), \\ u(0) = u(1) = 0. \end{cases} \tag{1}$$

取一右端项 $f \in L^2_{\text{loc}}(\Omega)$：

$$f(x) = \frac{1}{x}. \tag{2}$$

显然 f 在 0 处不连续，且 $f \notin L^2(\Omega)$。我们导出精确解：

$$u(x) = x \ln x. \tag{3}$$

注意到 $u \in H^1(\Omega) \cap C(\overline{\Omega})$。使用非均匀网格 $x_i = (i/N)^2$，取 $\mathcal{P}_1$ 元。使用预优共轭梯度法 (Preconditioned CG) 求解，用超松弛迭代 (SSOR) 作为预优因子，超松弛系数取 $2-\varepsilon$，其中 $\varepsilon = 10^{-12}$。右端项的数值积分由单元中点处的取值代替。注意：对于 $x_0 = 0$ 的节点基函数 Φ_0，我们知道 $\langle f, \Phi_0 \rangle$ 是发散的，但在 Dirichlet 边界条件下，我们不需要这一项。

1.2 编译说明

请安装 deal.ii 及其依赖库，见 https://www.dealii.org/developer/readme.html；安装完毕后，在本文档目录下打开终端，依次运行：

```
cd src-p1
mkdir build
cd build
cmake ..
make release
make
```

等待编译完成后，用以下命令执行测试：

```
./elliptic 10 u
```

上述测试采用 1.1 节所述的非均匀网格，规模为 $N = 2^{10}$，如果需要改变网格规模，将 `10` 换成别的正整数即可。另外，如果想测试均匀网格，只需将上述命令中的 `u` 删去即可。

1.3 测试结果

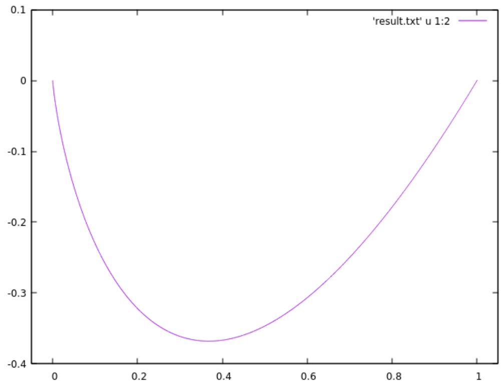

图 1: $N = 2^{14}$ 时非均匀网格的数值解 u_h

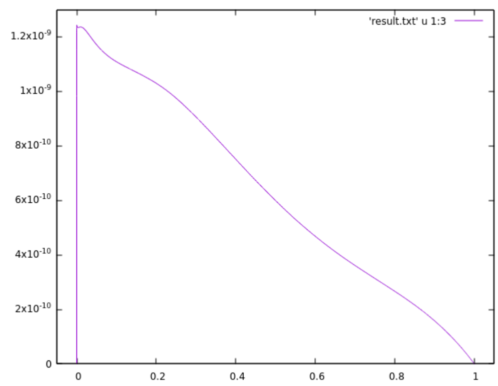

图 2: $N = 2^{14}$ 时非均匀网格的误差 $u_h - u$

可以看到，误差集中在奇异点附近。

单元数量	2^{14}	阶数	2^{15}	阶数	2^{16}	阶数	2^{17}
$\|\|u-u_h\|\|_{L_2}$	1.90e-09	1.92	5.02e-10	1.51	1.76e-10	2.16	3.95e-11
$\|\|u-u_h\|\|_{L_\infty}$	2.91e-09	2.00	7.30e-10	1.59	2.42e-10	1.18	1.07e-10
$\|\|u-u_h\|\|_{H_1}$	1.60e-04	0.96	8.24e-05	0.96	4.25e-05	0.96	2.19e-05
CG 迭代次数	14		16		17		19
装配耗时 (s)	0.019		0.035		0.072		0.15
求解耗时 (s)	0.0051		0.010		0.024		0.048

表 1: 预优共轭梯度法，预优因子：SSOR，超松弛系数：$2-\varepsilon$ ($\varepsilon = 10^{-12}$)

由于网格尺寸太细，在机器精度的限制下，L_2 和 L_∞ 范数已经无法继续下降。另外可以看到，SSOR 作为预优因子效果非常好，随着网格加密，CG 迭代次数基本不会增加。换言之，当超松弛系数趋近于 2 时，在 SSOR 的作用下，迭代矩阵的条件数与网格尺寸几乎无关。

刚度矩阵条件数（二范数下）的数值结果如下，数值结果支持 $\kappa(A) \sim O(N^3)$：

单元数量	256	阶数	512	阶数	1024
$\kappa(A)$	1.93116e+06	2.99	1.53591e+07	3.00	1.22513e+08

表 2: 刚度矩阵的二范数条件数，即 $\kappa(A) = ||A||_2 \cdot ||A^{-1}||_2$

为了测试刚度矩阵的条件数对求解性能的影响，我们不使用预优因子再进行一次测试。与预优 CG 相比，朴素 CG 的求解性能大大降低，我们只好将网格规模减小以进行测试。

单元数量	2^{12}	增长率	2^{13}	增长率	2^{14}
CG 迭代次数	42996	2.86	122781	2.85	350164
装配耗时 (s)	0.005		0.01		0.02
求解耗时 (s)	0.49		2.35		12.7

表 3: 朴素共轭梯度法

2 编程第二题

2.1 求解设置

求解 PDE

$$\begin{cases} -u'' + u = f, \quad \text{in } \Omega = (0,1), \\ u'(0) = u'(1) = 0. \end{cases} \tag{4}$$

取精确解:

$$u(x) = \cos(\pi x). \tag{5}$$

导出右端项:

$$f(x) = (1+\pi^2)\cos(\pi x). \tag{6}$$

网格为均匀网格 $\mathcal{T}_1, ..., \mathcal{T}_5$，其剖分节点为

$$0 = x_{j,0} < x_{j,1} < \cdots < x_{j,N_j} = 1, \tag{7}$$

其中 $x_i = i/N_j$，$N_j = 2^{2j+5}$。求解器使用 deal.ii 提供的 `PreconditionSOR`，松弛系数取 1.0，从而等价于 Gauss-Seidel 迭代法。

对于一些简单的积分，我们直接计算。我们记

$$s(j,k) = \begin{cases} 1, & k = 0 \text{ or } k = N_j, \\ 2, & \text{otherwise}, \end{cases} \tag{8}$$

有梯度积分公式:

$$(\nabla\phi_{(j,k)}, \nabla\phi_{(j,k)}) = s(j,k)N_j, \tag{9}$$

$$(\nabla\phi_{(j,k)}, \nabla\phi_{(j,k\pm1)}) = -N_j, \tag{10}$$

$$(\nabla\phi_{(j+p,4^pk)}, \nabla\phi_{(j,k)}) = (\nabla\phi_{(j,k)}, \nabla\phi_{(j+p,4^pk)}) = s(j,k)N_j, \tag{11}$$

$$(\nabla\phi_{(j+p,4^p(k\pm1))}, \nabla\phi_{(j,k)}) = (\nabla\phi_{(j,k)}, \nabla\phi_{(j+p,4^p(k\pm1))}) = -N_j, \tag{12}$$

$$\text{otherwise:} \quad (\nabla\phi_{(j,k)}, \nabla\phi_{(l,m)}) = 0. \tag{13}$$

以及**同层**基函数的积分公式:

$$(\phi_{(j,k)}, \phi_{(j,k)}) = \frac{s(j,k)}{3N_j}, \tag{14}$$

$$(\phi_{(j,k)}, \phi_{(j,k\pm1)}) = \frac{1}{6N_j}, \tag{15}$$

$$\text{otherwise:} \quad (\phi_{(j,k)}, \phi_{(j,m)}) = 0. \tag{16}$$

两个**不同层**节点基函数相乘的积分值算起来比较麻烦，我们直接用两点高斯求积公式（具有三阶代数精度）。对于右端项数值积分，我们把每个积分区间划分成长度为 $1/N_5$ 的小区间，在每个小区间上用中点处的值代替积分值，然后将小区间积分值累加。

2.2 编译说明

请安装 deal.ii 及其依赖库，见 https://www.dealii.org/developer/readme.html；安装完毕后，在本文档目录下打开终端，依次运行:

```
cd src-p2
cd GS
mkdir build
cd build
cmake ..
make release
make
./GS
```

即可测试在 $\mathcal{T}_5$ 上的 Gauss-Seidel 迭代。重新在本文档目录下打开终端，依次运行：

```
cd src-p2
cd bigGS
mkdir build
cd build
cmake ..
make release
make
./bigGS
```

即可测试在 $\mathcal{T}_1, ..., \mathcal{T}_5$ 上的 big Gauss-Seidel 迭代。

2.3 测试结果

起初，我们使用了 big Gauss-Seidel 迭代，取得了如下结果。

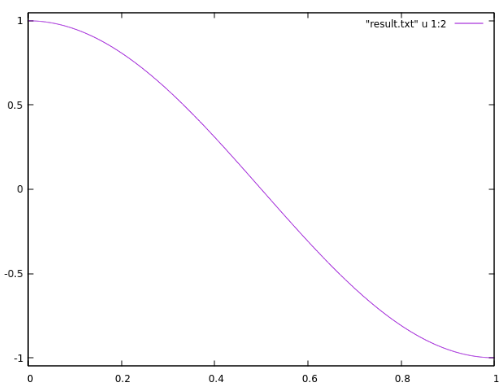

图 3: big Gauss-Seldel 的数值解

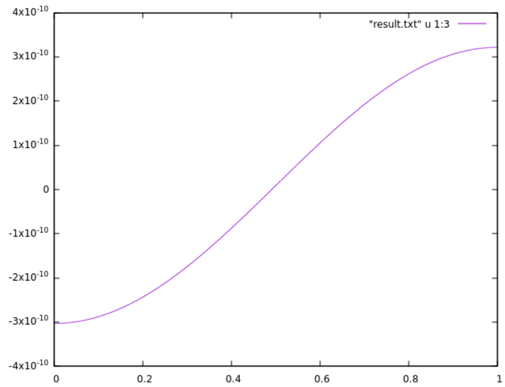

图 4: big Gauss-Seldel 的误差

我们计算误差函数的离散 L_2 范数，即

$$||e_h|| = \sqrt{\frac{1}{N_5+1}\sum_{k=0}^{N_5} e_h^2(x_{5,k})}. \tag{17}$$

结果如下表。然而，Gauss-Seidel 的计算时间过长，我们不愿浪费计算资源继续计算，故在超过 4h 之后将计算进程终止。另外，我们也尝试将 $\mathcal{T}_1, ..., \mathcal{T}_5$ 五层网格离散出的 big 方程组用 symmetric SSOR 求解，结果一并列出。

	离散 L_2 误差	迭代次数	求解耗时
Gauss-Seidel			>4h
big Gauss-Seidel	2.21e-10	316344	211s
big symmetric SSOR	2.22e-10	41060	47s

表 4: GS 和 big GS 的效率对比