计算方法大作业

李子龙
123033910195

2023 年 11 月 18 日

目　录

1　问题

解方程组 $\boldsymbol{A}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b}$，其中

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} 6 & 1 & & & \\ 8 & 6 & 1 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & 8 & 6 & 1 \\ & & & 8 & 6 \end{pmatrix} \qquad \boldsymbol{b} = \begin{pmatrix} 7 \\ 15 \\ \vdots \\ 15 \\ 14 \end{pmatrix}$$

显然精确解为 $\boldsymbol{x}^* = (1, 1, \cdots, 1)^\top$。

2 约定

基于 Python 3 以及 numpy 库(下为 np)编写,所有矩阵的数据类型均为 64 位浮点数(np.float64)。下述解法均派生于一个公共类 Solver，每个子类将会实现方法 solve()：

```
class Solver:
    """
    求解线性方程 Ax=b
    """
    def __init__(self, A: np.array, b: np.array):
        """
        A: n x m 矩阵
        b: n x 1 矩阵
        """
        self.A = A
        self.b = b
        assert len(self.A) == len(self.b)
        self.n = len(self.A)
        self.m = len(self.A[0])

    def solve(self):
        raise NotImplementedError
```

考虑到输出每行均为 1，输出将会使用 ∞-范数与精确值 $\|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^*\|_\infty$ 进行比较。

```
def construct_input(n):
    """
    构造输入
    """
    A = np.diag([6]*n, 0)+np.diag([8]*(n-1), -1)+np.diag([1]*(n-1), 1)
    b = np.array([7]+[15]*(n-2)+[14])
    return np.asarray(A, np.float64), np.asarray(b, np.float64)


def compare_output(x, target):
    return np.linalg.norm(x - target, np.inf)
```

对于迭代法:Jacobi 迭代法(第 6 节)和 Guass–Seidel 迭代法(第 7 节),均派生于 IterativeSolver 类。设定迭代初值为 $\boldsymbol{x}_0=(0,0,\cdots,0)^\top$，最大迭代次数为 1000。迭代终止条件为 $\left\|\boldsymbol{x}^{(k)}-\boldsymbol{x}^{(k-1)}\right\|_\infty<10^{-4}$ 或达到了最大迭代次数，实现于 self.iter_manager()。

```
class IterativeSolver(Solver):
    """
    迭代法公共类
    """
    def __init__(self, A: np.array, b: np.array, x0 = None, maxiter = 1000, xnormthres = 1e-4):
        super().__init__(A, b)
        assert self.m == self.n
        if x0 is None:
            x0 = np.zeros(len(A))
        self.x0 = x0
        self.maxiter = maxiter
        self.xnormlist = []
        self.xnormthres = xnormthres

    def iter_manager(self, xnorm, iternum):
        if iternum > len(self.xnormlist) + 1:
            self.xnormlist.clear()
        self.xnormlist.append(xnorm)
        return xnorm >= self.xnormthres and iternum < self.maxiter
```

3 顺序 Guass 消元法

```python
class SeqGuassSolver(Solver):
    """
    顺序 Guass 消元法
    """
    def solve(self):
        A = np.copy(self.A)
        b = np.copy(self.b)

        # 消元过程
        for k in range(self.m):
            for i in range(k + 1, self.n):
                coeff = A[i][k] / A[k][k]
                for j in range(self.m):
                    A[i][j] -= A[k][j] * coeff
                b[i] -= b[k] * coeff

        # 回代过程
        x = np.empty(self.m)
        for i in reversed(range(self.n)):
            s = b[i]
            for j in range(i + 1, self.m):
                s -= A[i][j] * x[j]
            x[i] = s / A[i][i]

        return x
```

```
顺序 Guass 消元法: n=10         inf-norm=2.842170943040401e-14
[1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1.]
顺序 Guass 消元法: n=30         inf-norm=2.980050339829l767e-08
[1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         0.99999999 1.00000001 0.99999998 1.00000003]
顺序 Guass 消元法: n=100         inf-norm=35182224605183.875
[ 1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  9.99999998e-01  1.00000000e+00  9.99999993e-01  1.00000001e+00
  9.99999970e-01  1.00000006e+00  9.99999881e-01  1.00000024e+00
  9.99999523e-01  1.00000095e+00  9.99998093e-01  1.00000381e+00
  9.99992371e-01  1.00001526e+00  9.99969484e-01  1.00006103e+00
  9.99877937e-01  1.00024413e+00  9.99511749e-01  1.00097650e+00
  9.98046994e-01  1.00390601e+00  9.92187977e-01  1.01562405e+00
  9.68751907e-01  1.06249619e+00  8.75007629e-01  1.24998474e+00
  5.00030518e-01  1.99993896e+00 -9.99877930e-01  4.99975586e+00
 -6.99951172e+00  1.69990234e+01 -3.09980469e+01  6.49960937e+01
 -1.26992187e+02  2.56984375e+02 -5.10968750e+02  1.02493750e+03
 -2.04687500e+03  4.09675000e+03 -8.19050000e+03  1.63840000e+04
 -3.27650000e+04  6.55330000e+04 -1.31063000e+05  2.62129000e+05
 -5.24254998e+05  1.04851299e+06 -2.09702297e+06  4.19404888e+06
 -8.38809450e+06  1.67761910e+07 -3.35523750e+07  6.71047370e+07
 -1.34209407e+08  2.68418561e+08 -5.36836095e+08  1.07366810e+09
 -2.14731981e+09  4.29457409e+09 -8.58888605e+09  1.71767236e+10
 -3.43492531e+10  6.86817300e+10 -1.37296355e+11  2.74324292e+11
 -5.47574907e+11  1.09085511e+12 -2.16453140e+12  4.26034751e+12
 -8.24583389e+12  1.53922233e+13 -2.63866685e+13  3.51822246e+13]
```

图 1 顺序 Guass 消元法结果

表 1 顺序 Guass 消元法结果与精确值的比较

阶数 n	∞-范数 $\lVert \boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}^* \rVert_\infty$
10	2.84×10^{-14}
30	2.98×10^{-8}
100	3.52×10^{13}

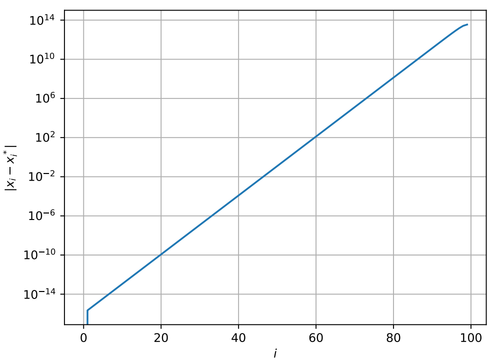

图 2 顺序 Guass 消元法 $n = 100$ 时结果每个坐标与精确值的差值绝对值

4 列主元 Guass 消元法

蓝色部分为列主元 Guass 消元法相较于顺序 Guass 消元法增加的代码部分。

```
class PivotGuassSolver(Solver):
    """
    选主元 Guass 消元法
    """
    def solve(self):
        A = np.copy(self.A)
        b = np.copy(self.b)

        # 消元过程
        for k in range(self.m):
            # 选主元
            max_pivot = abs(A[k][k])
            max_line = k
            for p in range(k + 1, self.n):
                if abs(A[p][k]) > max_pivot:
                    max_pivot = abs(A[p][k])
                    max_line = p

            # 交换行元素
            for j in range(self.m):
                tmp = A[k][j]
                A[k][j] = A[max_line][j]
                A[max_line][j] = tmp
            tmp = b[k]
            b[k] = b[max_line]
            b[max_line] = tmp

            for i in range(k + 1, self.n):
                coeff = A[i][k] / A[k][k]
                for j in range(self.m):
                    A[i][j] -= A[k][j] * coeff
                b[i] -= b[k] * coeff

        # 回代过程
        x = np.empty(self.m)
        for i in reversed(range(self.n)):
            s = b[i]
            for j in range(i + 1, self.m):
                s -= A[i][j] * x[j]
            x[i] = s / A[i][i]

        return x
```

```
列主元 Guass 消元法: n=10          inf-norm=0.0
[1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1.]
列主元 Guass 消元法: n=30          inf-norm=0.0
[1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1.
↪  1. 1.
 1. 1. 1. 1. 1. 1.]
列主元 Guass 消元法: n=100          inf-norm=0.18333333333333335
[1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         0.99999999 1.00000001 0.99999998 1.00000004 0.99999991
 1.00000017 0.99999965 1.0000007  0.9999986  1.0000028  0.99999441
 1.00001119 0.99997762 1.00004476 0.99991049 1.00017899 0.9996421
 1.00071545 0.99857051 1.00285339 0.99431559 1.0112793  0.97779948
 1.04296875 0.91979167 1.1375     0.81666667]
```

图 3 列主元 Guass 消元法结果

表 2 列主元 Guass 消元法结果与精确值的比较

阶数 n	∞-范数 $\|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^*\|_\infty$
10	0
30	0
100	0.183

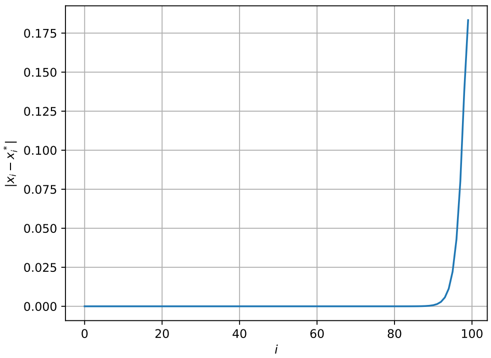

图 4 列主元 Guass 消元法 $n = 100$ 时结果每个坐标与精确值的差值绝对值

5 追赶法

追赶法增加了对是否是三对角矩阵以及对角占优矩阵的检查。

```python
class ThomasSolver(Solver):
    """
    追赶法
    """
    def solve(self):
        A = np.copy(self.A)
        b = np.copy(self.b)

        # 检查是否是三对角矩阵以及对角占优
        is_square = self.m == self.n
        is_lower_zero = np.array_equal(np.tril(A, -2), np.zeros([self.n, self.m]))
        is_upper_zero = np.array_equal(np.triu(A, 2), np.zeros([self.n, self.m]))
        if not (is_square and is_lower_zero and is_upper_zero):
            print(" 不是三对角矩阵! ")

        is_dominant = (abs(A[0][0]) > abs(A[0][1]) > 0)
        for i in range(self.n - 1):
            is_dominant &= (abs(A[i][i]) >= abs(A[i][i-1]) + abs(A[i][i+1]))
        is_dominant &= (abs(A[self.n-1][self.n-1]) > abs(A[self.n-1][self.n-2]) >
        ↪  0)
```

```python
if not is_dominant:
    print(" 不是对角占优! ")

# 计算 beta
beta = np.empty(self.n - 1)
beta[0] = A[0][1] / A[0][0]
for i in range(1, self.n - 1):
    beta[i] = A[i][i+1] / (A[i][i] - A[i][i-1] * beta[i-1])

# 解 Ly=f
y = np.empty(self.n)
y[0] = b[0] / A[0][0]
for i in range(1, self.n):
    y[i] = (b[i] - A[i][i-1] * y[i-1]) / (A[i][i] - A[i][i-1] * beta[i-1])

# 解 Ux=y
x = np.empty(self.n)
x[self.n - 1] = y[self.n - 1]
for i in reversed(range(self.n - 1)):
    x[i] = y[i] - beta[i] * x[i+1]

return x
```

```
不是对角占优!
追赶法: n=10        inf-norm=2.842170943040401e-14
[1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1.]
不是对角占优!
追赶法: n=30        inf-norm=2.9800503398291767e-08
[1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.00000001 0.99999999 1.00000002 0.99999997]
不是对角占优!
追赶法: n=100        inf-norm=35182224605183.875
[ 1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  9.99999999e-01
  1.00000000e+00  9.99999996e-01  1.00000001e+00  9.99999985e-01
  1.00000003e+00  9.99999940e-01  1.00000012e+00  9.99999762e-01
  1.00000048e+00  9.99999046e-01  1.00000191e+00  9.99996186e-01
  1.00000763e+00  9.99984742e-01  1.00003052e+00  9.99938969e-01
  1.00012206e+00  9.99755874e-01  1.00048825e+00  9.99023497e-01
  1.00195301e+00  9.96093988e-01  1.00781202e+00  9.84375954e-01
  1.03124809e+00  9.37503815e-01  1.12499237e+00  7.50015259e-01
  1.49996948e+00  6.10351563e-05  2.99987793e+00 -2.99975586e+00
  8.99951172e+00 -1.49990234e+01  3.29980469e+01 -6.29960937e+01
  1.28992187e+02 -2.54984375e+02  5.12968750e+02 -1.02293750e+03
  2.04887500e+03 -4.09475000e+03  8.19250000e+03 -1.63820000e+04
  3.27670000e+04 -6.55310000e+04  1.31065000e+05 -2.62127000e+05
  5.24256998e+05 -1.04851099e+06  2.09702497e+06 -4.19404688e+06
  8.38809650e+06 -1.67761890e+07  3.35523770e+07 -6.71047350e+07
  1.34209409e+08 -2.68418559e+08  5.36836097e+08 -1.07366810e+09
  2.14731981e+09 -4.29457409e+09  8.58888605e+09 -1.71767236e+10
  3.43492531e+10 -6.86817300e+10  1.37296355e+11 -2.74324292e+11
  5.47574907e+11 -1.09085511e+12  2.16453140e+12 -4.26034751e+12
  8.24583389e+12 -1.53922233e+13  2.63866685e+13 -3.51822246e+13]
```

图 5 追赶法结果

表 3 追赶法结果与精确值的比较

阶数 n	∞-范数 $\\|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^*\\|_\infty$
10	2.84×10^{-14}
30	2.98×10^{-8}
100	3.52×10^{13}

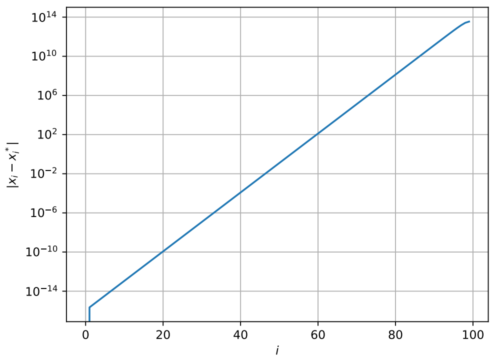

图 6 追赶法 $n=100$ 时结果每个坐标与精确值的差值绝对值

6 Jacobi 迭代法

```python
class JacobiSolver(IterativeSolver):
    """
    Jacobi 迭代法
    """
    def solve(self):
        x = np.copy(self.x0)
        A = np.copy(self.A)
        b = np.copy(self.b)
        xnorm = np.inf
        iternum = 0

        while self.iter_manager(xnorm, iternum):
            newx = np.empty(self.n)
            for i in range(self.n):
                s = 0
                for j in range(self.n):
                    if j == i:
                        continue
                    s += A[i][j] * x[j]
                newx[i] = (b[i] - s) / A[i][i]
            xnorm = np.linalg.norm(newx - x, np.inf)
            x = newx
            iternum += 1

        print(" 迭代次数: {}".format(iternum))
        return x
```

```
迭代次数: 159
Jacobi 迭代法: n=10         inf-norm=5.590596764126765e-05
[1.         1.00000003 1.00000006 1.00000035 1.00000065 1.00000307
 1.00000481 1.00001875 1.00002288 1.00005591]
迭代次数: 526
Jacobi 迭代法: n=30         inf-norm=3.96780056398649e-05
[1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 0.99999999 0.99999999 0.99999996 0.99999993 0.99999972 0.99999956
 0.99999824 0.99999736 0.99999028 0.99998695 0.99996032 0.99996473]
迭代次数: 1000
Jacobi 迭代法: n=100         inf-norm=164270699135404.9
[ 1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  9.99999999e-01  1.00000000e+00  9.99999998e-01
  1.00000000e+00  9.99999990e-01  1.00000000e+00  9.99999960e-01
  1.00000000e+00  9.99999841e-01  1.00000000e+00  9.99999364e-01
  1.00000000e+00  9.99997457e-01  1.00000000e+00  9.99989827e-01
  1.00000000e+00  9.99959310e-01  1.00000000e+00  9.99837240e-01
  1.00000000e+00  9.99348958e-01  1.00000000e+00  9.97395833e-01
  9.99999998e-01  9.89583330e-01  9.99999984e-01  9.58333307e-01
  9.99999878e-01  8.33333129e-01  9.99999058e-01  3.33331753e-01
  9.99992800e-01 -1.66667876e+00  9.99945490e-01 -9.66675830e+00
  9.99590932e-01 -4.16673545e+01  9.96954343e-01 -1.69671787e+02
  9.77488166e-01 -6.81704497e+02  8.34728890e-01 -2.72994420e+03
 -2.05590268e-01 -1.09236892e+04 -7.74050676e+00 -4.37043123e+04
 -6.19921240e+01 -1.74867068e+05 -4.50325166e+02 -6.99803623e+05
 -3.21374724e+03 -2.80156210e+06 -2.27610092e+04 -1.12226838e+07
 -1.60165748e+05 -4.50050936e+07 -1.11954274e+06 -1.80809861e+08
 -7.76799062e+06 -7.28639006e+08 -5.34436267e+07 -2.95106032e+09
 -3.63968007e+08 -1.20473284e+10 -2.44716291e+09 -4.97743327e+10
 -1.61761911e+10 -2.09109892e+11 -1.04402949e+11 -8.96432177e+11
 -6.50054534e+11 -3.90993802e+12 -3.81532093e+12 -1.69730829e+13
 -2.00233770e+13 -6.76384210e+13 -7.93116926e+13 -1.64270699e+14]
```

图 7 Jacobi 迭代法结果

表 4 Jacobi 迭代法结果与精确值的比较

阶数 n	迭代次数 T	∞-范数 $\|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^*\|_\infty$
10	159	5.59×10^{-5}
30	526	3.97×10^{-5}
100	1000	1.64×10^{14}

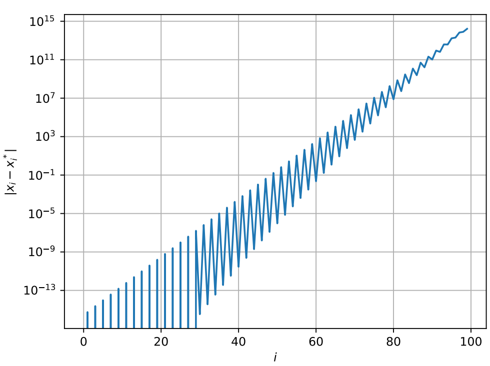

图 8 Jacobi 迭代法 $n=100$ 时结果每个坐标与精确值的差值绝对值

7 Guass–Seidel 迭代法

```
class GuassSeidelSolver(IterativeSolver):
    """
    Guass-Seidel 迭代法
    """
    def solve(self):
        x = np.copy(self.x0)
        A = np.copy(self.A)
        b = np.copy(self.b)
        xnorm = np.inf
        iternum = 0

        while self.iter_manager(xnorm, iternum):
            newx = np.empty(self.n)
            for i in range(self.n):
                s = 0
                for j in range(i):
                    s += A[i][j] * newx[j]
                for j in range(i + 1, self.n):
                    s += A[i][j] * x[j]
                newx[i] = (b[i] - s) / A[i][i]
            xnorm = np.linalg.norm(newx - x, np.inf)
            x = newx
            iternum += 1

        print(" 迭代次数: {}".format(iternum))
        return x
```

蓝色部分为 Guass–Seidel 迭代法相较于 Jacobi 迭代法修改的部分。

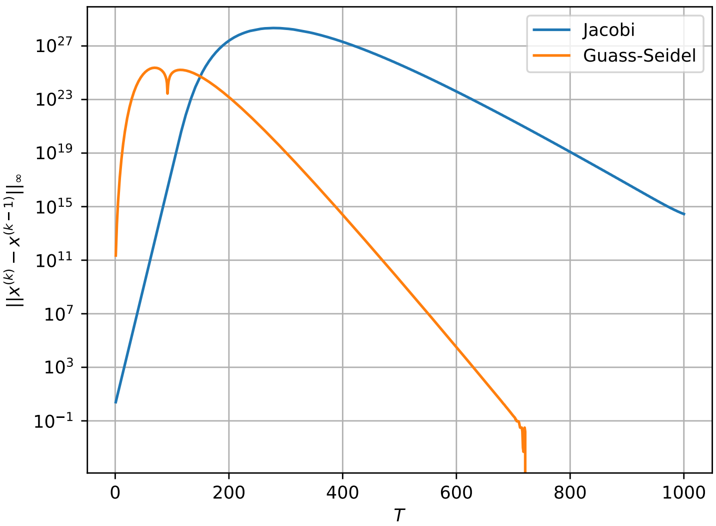

图 9 $n = 100$，**Jacobi 迭代法和 Guass–Seidel 迭代法** $\left\|x^{(k)} - x^{(k-1)}\right\|$ 与迭代次数 T 的关系

```
迭代次数: 52
Guass-Seidel 迭代法: n=10        inf-norm=0.0004310713408720579
[1.00000009 0.99999955 1.00000161 0.99999504 1.00001381 0.99996466
 1.00008309 0.99982337 1.0003233  0.99956893]
迭代次数: 208
Guass-Seidel 迭代法: n=30        inf-norm=0.0006899434846300029
[1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         1.         1.         1.
 1.         1.         1.         0.99999999 1.00000002 0.99999995
 1.00000014 0.99999964 1.00000089 0.9999978  1.00000535 0.99998725
 1.00002966 0.99993317 1.00014405 0.99970992 1.00051746 0.99931006]
迭代次数: 722
Guass-Seidel 迭代法: n=100        inf-norm=93824992236886.06
[ 1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00  1.00000000e+00
  1.00000000e+00  9.99999999e-01  1.00000000e+00  9.99999998e-01
  1.00000000e+00  9.99999990e-01  1.00000002e+00  9.99999960e-01
  1.00000008e+00  9.99999841e-01  1.00000032e+00  9.99999364e-01
  1.00000127e+00  9.99997457e-01  1.00000509e+00  9.99989827e-01
  1.00002035e+00  9.99959310e-01  1.00008138e+00  9.99837240e-01
  1.00032552e+00  9.99348958e-01  1.00130208e+00  9.97395833e-01
  1.00520833e+00  9.89583333e-01  1.02083333e+00  9.58333333e-01
  1.08333333e+00  8.33333333e-01  1.33333333e+00  3.33333333e-01
  2.33333333e+00 -1.66666667e+00  6.33333333e+00 -9.66666667e+00
  2.23333333e+01 -4.16666667e+01  8.63333333e+01 -1.69666667e+02
  3.42333333e+02 -6.81666667e+02  1.36633333e+03 -2.72966667e+03
  5.46233333e+03 -1.09216667e+04  2.18463333e+04 -4.36896667e+04
  8.73823333e+04 -1.74761667e+05  3.49526333e+05 -6.99049665e+05
  1.39810233e+06 -2.79620165e+06  5.59240625e+06 -1.11848093e+07
  2.23696210e+07 -4.47392363e+07  8.94784650e+07 -1.78956884e+08
  3.57913601e+08 -7.15826516e+08  1.43165031e+09 -2.86328968e+09
  5.72653568e+09 -1.14528966e+10  2.29050941e+10 -4.58073921e+10
  9.16035994e+10 -1.83162459e+11  3.66145962e+11 -7.31576096e+11
  1.46028888e+12 -2.90912452e+12  5.77243605e+12 -1.13616202e+13
  2.19902326e+13 -4.10484341e+13  7.03687442e+13 -9.38249922e+13]
```

图 10 Guass–Seidel 迭代法结果

表 5 Guass–Seidel 迭代法结果与精确值的比较

阶数 n	迭代次数 T	∞-范数 $\|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^*\|_\infty$
10	52	0.000431
30	208	0.000690
100	722	9.38×10^{13}

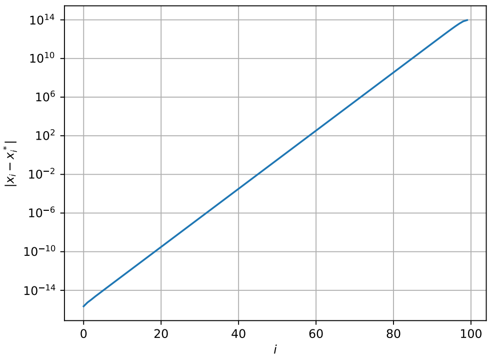

图 11 Guass–Seidel 迭代法 $n = 100$ 时结果每个坐标与精确值的差值绝对值

8 总结

表 6 不同方法结果与准确值的 ∞-范数 $\|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^*\|_\infty$ 比较表

n	顺序 Guass 迭代法	列主元 Guass 迭代法	追赶法	Jacobi 迭代法	Guass–Seidel 迭代法
10	2.84×10^{-14}	0	2.84×10^{-14}	5.59×10^{-5}	0.000431
30	2.98×10^{-8}	0	2.98×10^{-8}	3.97×10^{-5}	0.000690
100	3.52×10^{13}	0.183	3.52×10^{13}	1.64×10^{14}	9.38×10^{13}

表 6 和图 12 展示了不同方法结果与准确值的 ∞-范数 $\|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^*\|_\infty$ 的比较，在 $n = 10, n = 30$ 时，这些方法结果与准确值的误差都是可以接受的。

对于直接法（顺序 Guass 消元法、列主元 Guass 消元法、追赶法），列主元 Guass 消元法是最优的，尽可能避免了大数除以小数的现象；顺序 Guass 消元法和追赶法结果与准确解的误差一致，但是对于这种特殊的三对角矩阵，追赶法的复杂度为 $O(n)$，比顺序 Guass 消元法、列主元 Guass 消元法的 $O(n^3)$ 下降了不少。

对于迭代法（Jacobi 迭代法、Guass–Seidel 迭代法），图 9 显示了两种方法迭代过程，可见 Guass–Seidel 迭代法比 Jacobi 迭代法收敛更快，Jacobi 迭代法在 $n = 100$ 的 1000 轮迭代后仍未收敛。迭代

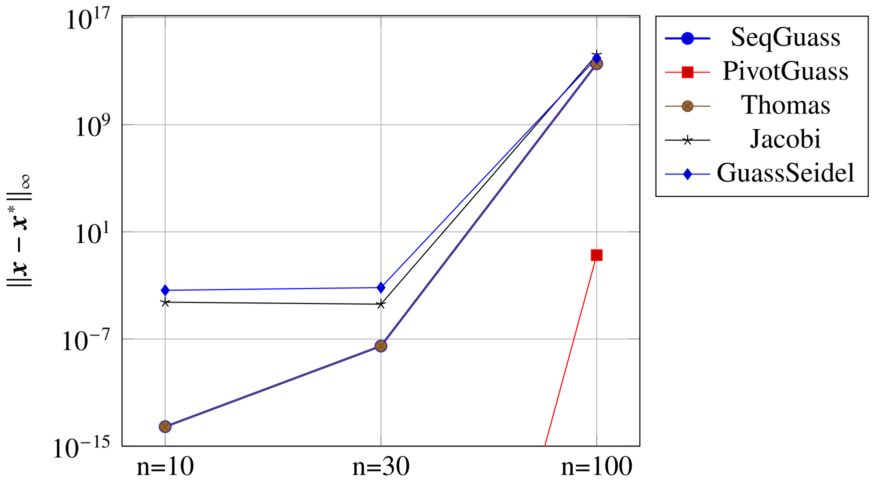

图 12 不同方法结果与准确值的 ∞-范数 $\|x - x^*\|_\infty$ 比较图

法的时间复杂度为 $O(Tn)$，T 为迭代次数。

从每种方法 $n = 100$ 时每个坐标与精确值的差值与绝对值图来看，下标越大，累计的误差越大，呈指数增长。最开始的一些值误差仍在控制范围之内。这就意味着对于这种大型矩阵而言，应当把重要的、精度要求高的变量放在前面（比如主成分分析中的主要成分），以达到更理想的效果。

总之，对于本题，列主元 Guass 消元法的结果是最优的。

- 对于大规模矩阵，尽可能地把重要的变量放在前面，
  - 对于三对角矩阵这种特殊情况，追赶法可能是运行速度最快的，如果是对角占优的，误差也会被控制；
  - 当不是三对角矩阵时，为了求解大规模矩阵可以考虑迭代法更快求解；
  - 合理时间范围内更精确的精度应该超过了这几种方法的范畴，需要进一步地根据实际问题优化；
- 对于小规模矩阵，由于顺序 Guass 消元法误差较大且要求对角线元素不为 0、追赶法误差与顺序 Guass 消元法一致，所以一般使用列主元 Guass 消元法精确求解。