

低秩矩阵完整化问题的几种高效解法

林陈冉

中国科学院大学

2016年12月24日

什么是低秩矩阵完整化

简单来说, 低秩矩阵完整化问题, 就是在仅仅知道矩阵的少部分元素的情况下, 恢复出这个矩阵的所有元素. 这个问题在统计, 图像处理, 计算几何, 机器学习, 信号处理, 模型控制等方面有广泛应用, 比如著名的NetFlix大奖赛问题.

数学模型

通常我们认为矩阵的秩比较小. 也就是这样的一个最优化问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & \text{rank}(X) \\ \text{s.t.} \quad & X_{ij} = M_{ij}, \forall (i, j) \in \Omega \end{aligned} \quad (1.1)$$

其中 $X, M \in \mathbb{R}^{p \times q}$, Ω 是已知元素的下标 (i, j) 构成的集合, $|\Omega| = m$.

在一些情况下, (1.1)等价于线性约束问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & \text{rank}(X) \\ \text{s.t.} \quad & \mathcal{A}(X) = b \end{aligned} \quad (1.2)$$

其中 $b \in \mathbb{R}^m$, $\mathcal{A}: \mathbb{R}^{p \times q} \rightarrow \mathbb{R}^m$ 是线性算子.

数学模型

但是(1.1), (1.2)都是"NP-难"的, 因此需要一定的转化. 这里我们用核范数来近似矩阵的秩, 把(1.1)与(1.2)转化为以下形式:

$$\begin{aligned} \min \quad & \|X\|_* \\ \text{s.t.} \quad & \mathcal{A}(X) = b \end{aligned} \tag{1.3}$$

$$\begin{aligned} \min \quad & \|X\|_* \\ \text{s.t.} \quad & X_{ij} = M_{ij}, \forall (i, j) \in \Omega \end{aligned} \tag{1.4}$$

数学模型

很自然的, 一个重要的问题是: (1.1)与(1.3), 或者(1.2)与(1.4)什么时候等价? 略过证明, 直接描述以下重要的结论:

- ▶ 对于(1.3), 当在某些正则条件下, 若已知元素个数 $|\Omega| = m = O(nr \cdot \text{polylog}(n))$, 其中 $n = \max(p, q)$, polylog 是多重对数函数, 则矩阵有很高概率可以恢复.
- ▶ 对于(1.4), 将线性映射 \mathcal{A} 的矩阵形式记作 A , 当 A 是一个随机高斯矩阵, 若向量 b 的维数 $m = O(r(p+q)\log(pq))$, 则矩阵有很高概率可以恢复.

数学模型

实际上, 由线性代数知识容易知道, (1.4)要求的线性约束条件并不总能成立, 因此有时需要适当松弛. 考虑(1.4)的罚函数:

$$\min \quad \|X\|_* + \frac{1}{2\mu} \|\mathcal{A}(X) - b\|_2^2 \quad (1.5)$$

其中 μ 是某个给定常数.

数学模型

下面, 将对(1.3), (1.4), (1.5)分别给出一种高效的解法.

- ▶ (1.3) → Alternating Direction Augmented Lagrangian法
- ▶ (1.4) → Row By Row法
- ▶ (1.5) → Fixed Point Continuation Apporximate法

问题转化

对于问题(1.3), 我们考虑它的对偶问题

$$\begin{aligned} \max_{y \in \mathbb{R}^m} \quad & b^\top y \\ \text{s.t.} \quad & \|\mathcal{A}^*(y)\|_2 \leq 1 \end{aligned} \tag{2.1}$$

引入一个形式上的变量 S , 将(2.1)变为如下的等价形式

$$\begin{aligned} \min_{y \in \mathbb{R}^m} \quad & -b^\top y \\ \text{s.t.} \quad & \mathcal{A}^*(y) - S = 0 \\ & \|S\|_2 \leq 1 \end{aligned} \tag{2.2}$$

问题转化

可以考虑(2.2)的增广Lagrange函数

$$L(y, S, X, \mu) = -b^\top y + \langle X, \mathcal{A}^*(y) - S \rangle + \frac{1}{2\mu} \|\mathcal{A}^*(y) - S\|_F^2 \quad (2.3)$$

由此我们得到(2.1)的一个等价问题

$$\begin{aligned} \min_{y, S} \quad & L(y, S, X, \mu) \\ \text{s.t.} \quad & \|S\|_2 \leq 1 \end{aligned} \quad (2.4)$$

通过选取最佳的 μ 和 X 可以求出(2.4)的最优解.

问题转化

对下面的几个量进行迭代, 可以求解问题(2.4)

$$\begin{aligned}\mu^{k+1} &= \alpha \mu^k, \quad \alpha \in (0, 1) \\ X^{k+1} &= X^k + \frac{\mathcal{A}^*(y^{k+1}) - S^{k+1}}{\mu^k}\end{aligned}\tag{2.5}$$

$$(y^{k+1}, S^{k+1}) = \arg \min_{y, S} L(y, S, X^k, \mu^k)$$

(2.5)第三式并不容易解, 因此我们考虑使用交替方向法

$$y^{k+1} = \arg \min_{y, S} L(y, S^k, X^k, \mu^k)\tag{2.6}$$

$$S^{k+1} = \arg \min_{y, S} L(y^{k+1}, S, X^k, \mu^k)\tag{2.7}$$

交替方向法

定理

当固定 S^k , (2.6)的最优解为:

$$y^{k+1} = \mu^k(b - \mathcal{A}(X^k)) + \mathcal{A}(S^k) \quad (2.8)$$

当固定 y^{k+1} , (2.7)的最优解为:

$$S^{k+1} = U \text{Diag}(\min\{\sigma, 1\})V^\top \quad (2.9)$$

其中 U, V 来自 $Y = \mathcal{A}^*(y^{k+1}) + \mu^k X^k$ 的奇异值分解, 即 $Y = U \text{Diag}(\sigma)V^\top$.

AAL法算法

算法

步1 给出 μ^0 , X^0 , y^0 , S^0 , ϵ , α , 设置计数器 $k = 0$;

步2 若 $\frac{\|X^{k+1} - X^k\|_F}{\max\{1, \|X^k\|_F\}} \leq \epsilon$, 则停止;

步3 计算 $y^{k+1} = \mu^k(b - \mathcal{A}(X^k)) + \mathcal{A}(S^k)$;

步4 计算 $Y = \mathcal{A}^*(y^{k+1}) + \mu^k X^k$, 并计算其SVD:

$$Y = U \text{Diag}(\sigma) V^\top;$$

步5 计算 $S^{k+1} = U \text{Diag}(\min\{\sigma, 1\}) V^\top$;

步6 计算 $X^{k+1} = \frac{Y - S^{k+1}}{\mu^k}$;

步7 计算 $\mu^{k+1} = \alpha \mu^k$, $k = k + 1$, 转步2.

SDP问题

对于问题(1.4), 我们可以考虑把它转化为一个半定规划(SDP)问题.

一个标准的半定规划问题是

$$\begin{aligned} \min_{X \in S^n} \quad & \langle C, X \rangle \\ \text{s.t.} \quad & \mathcal{A}(X) = b, X \succ 0 \end{aligned} \tag{3.1}$$

其中 $b \in \mathbb{R}^m$, $\mathcal{A}(X) = (\langle A^{(1)} X \rangle, \dots, \langle A^{(m)} X \rangle)$, $C, A^{(i)} \in S^n$, S^n 是全体对称矩阵.

Schur补

定义

对于一个对称正定矩阵 $X \in S^n$, 我们可以把它写成分块矩阵的形式

$$X = \begin{pmatrix} \xi & y^\top \\ y & B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & y^\top B^{-1} \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi - y^\top B^{-1}y & 0 \\ 0 & B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ B^{-1}y & I \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$(X/B) = \xi - y^\top B^{-1}y$, 称为 X 对于 B 的Schur补, 具有性质

$$X \succeq 0 \Leftrightarrow B \succeq 0, (X/B) \geq 0 \quad (3.3)$$

SOCP问题

约定以下记号

$$X_{\alpha, \beta} = \begin{cases} x_{\alpha\beta} & \alpha, \beta \in \mathbb{R} \\ (x_{\alpha\beta_1}, \dots, x_{\alpha\beta_n}) & \alpha \in \mathbb{R}, \beta = \{\beta_1, \dots, \beta_n\} \\ (x_{\alpha_1\beta}, \dots, x_{\alpha_m\beta})^\top & \alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_m\}, \beta \in \mathbb{R} \\ \begin{pmatrix} x_{\alpha_1\beta_1} & \cdots & x_{\alpha_1\beta_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{\alpha_m\beta_1} & \cdots & x_{\alpha_m\beta_n} \end{pmatrix} & \alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_m\}, \beta = \{\beta_1, \dots, \beta_n\} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$i^c = \{1, \dots, n\} \setminus \{i\} = \{1, \dots, i-1, i+1, \dots, n\} \quad (3.5)$$

SOCP问题

令 $X = \begin{pmatrix} \xi & y^\top \\ y & B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{i,i} & X_{i,i^c} \\ X_{i^c,i} & X_{i^c,i^c} \end{pmatrix}$, 等号在相差一个初等变化下成立. 基于Schur补, 令 i 取遍 $\{1, \dots, n\}$, 逐行解如下的SOCP问题来解决SDP问题(3.1)

$$\begin{aligned} \min_{[\xi; y] \in \mathbb{R}^n} \quad & \bar{c}^\top \begin{pmatrix} \xi \\ y \end{pmatrix} \\ \text{s.t.} \quad & \bar{A} \begin{pmatrix} \xi \\ y \end{pmatrix} = \bar{b} \\ & (X/B) \geq \delta \end{aligned} \tag{3.6}$$

SOCP问题

其中

$$\bar{c} = \begin{pmatrix} C_{i,i} \\ 2C_{i^c,i} \end{pmatrix}, \quad \bar{A} = \begin{pmatrix} A_{i,i}^{(1)} & 2A_{i,i^c}^{(1)} \\ \dots & \dots \\ A_{i,i}^{(m)} & 2A_{i,i^c}^{(m)} \end{pmatrix}, \quad \bar{b} = \begin{pmatrix} b_1 - \langle A_{i^c,i^c}^{(1)}, B \rangle \\ \dots \\ b_m - \langle A_{i^c,i^c}^{(m)}, B \rangle \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

若 X 是半正定的, 即 $X \succeq 0$, 取 $\delta = 0$;

若 X 是正定的, 即 $X \succ 0$, 用大于零的数来限制Schur补, 取 $\delta > 0$.

罚函数

考虑(3.6)的罚函数

$$F(X, \mu) = \bar{c}^\top \begin{pmatrix} \xi \\ y \end{pmatrix} + \frac{1}{2\mu} \|\bar{A}[\xi; y] - \bar{b}\|_2^2 \quad (3.8)$$

其中 $\mu > 0$ 是给定的.

(3.6)等价于以下问题

$$\begin{aligned} \min_X \quad & F(X, \mu) \\ \text{s.t.} \quad & X \succeq 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

用SDP和RBR法补全矩阵

回头考虑(1.4), 我们需要把它转化为一个SDP问题(3.1), 考虑两种情况:

- ▶ 当 $X \in S^n$, $\|X\|_* = \text{tr}(X)$, (1.4)等价于下面的SDP问题

$$\begin{aligned} \min_X \quad & \text{tr}(X) = \langle E, X \rangle \\ \text{s.t.} \quad & X_{ij} = M_{ij}, \quad \forall (i, j) \in \Omega \end{aligned} \tag{3.10}$$

用SDP和RBR法补全矩阵

- 当 $X \in \mathbb{R}^{p \times q}$ 不是对称正定的, 可以考虑一个更大的对称正定矩阵 W . 当补全了 W , 则 X 自然被补全了

$$\begin{aligned} \min_X \quad & tr(X) \\ \text{s.t.} \quad & X = \begin{pmatrix} X_1 & W \\ W^\top & X_2 \end{pmatrix} \succ 0 \\ & W_{ij} = M_{ij}, \quad \forall (i, j) \in \Omega \end{aligned} \quad (3.11)$$

其中 $X \in S^n$, $n = p + q$, $W_1 \in S^p$, $W_2 \in S^q$, $X, W_1, W_2 \succ \delta$.

用SDP和RBR法补全矩阵

我们主要讨论一般的情况, 即问题(3.11). 对于某个 i , 我们把向量 y 分为两个部分, 即

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}, \quad y_1 = X_{\alpha_i, i}, \quad y_2 = X_{\beta_i, i} \quad (3.12)$$

其中 $\alpha_i = \begin{cases} \{j + p | (i, j \in \Omega)\}, i \leq p \\ \{j | (j, i - p) \in \Omega\}, p < i \leq n \end{cases}$, $\beta_i = \{1, \dots, p\} \setminus (\alpha_i \cup \{i\})$, y_1

是 X 第 i 列除去第 i 行后所有已知元素构成的列向量, y_2 是 X 第 i 列除去第 i 行后所有未知元素构成的列向量.

用SDP和RBR法补全矩阵

分解这个对称正定矩阵 X , 使其符合SOCP问题(3.6)的形式, 令

$$B = \begin{pmatrix} X_{\alpha_i, \alpha_i} & X_{\alpha_i, \beta_i} \\ X_{\beta_i, \alpha_i} & X_{\beta_i, \beta_i} \end{pmatrix}, \quad \xi = X_{i,i}.$$

对照SOCP问题的罚函数形式(3.9), 同时, 可以给出 $\bar{A} \begin{pmatrix} \xi \\ y \end{pmatrix}$, \bar{b} 和 \bar{c} 的显式表达

$$\bar{b} = \begin{cases} (M_{i, \alpha_i-p})^\top, & i \leq p \\ M_{\alpha_i, i-p}, & p < i \leq n \end{cases}, \quad \bar{A} \begin{pmatrix} \xi \\ y \end{pmatrix} = y_1, \quad \bar{c} = (1, \overbrace{0, \dots, 0}^{n-1}) \quad (3.13)$$

用SDP和RBR法补全矩阵

故(3.9)化为以下形式

$$\begin{aligned} \min \quad & \xi + \frac{1}{2\mu} \|y_1 - \bar{b}\|_2^2 \\ \text{s.t.} \quad & \xi - y^\top B^{-1} y \geq \delta \end{aligned} \quad (3.14)$$

现在只需要解这个问题的最优解, 即可得到矩阵 X 的第 i 行和第 i 列, 当 i 循环取遍 1 到 n , 就可以得到原问题(3.11)的最优解, 从而求得目标矩阵 W .

用SDP和RBR法补全矩阵

定理

问题(3.14)的最优解为

$$\begin{aligned} y_1 &= (2\mu I + X_{\alpha, \alpha})^{-1} X_{\alpha, \alpha} \\ y_2 &= \frac{1}{2\mu} X_{\beta, \alpha} (\bar{b} - y_1) \\ \xi &= \frac{1}{2\mu} y_1^\top (\bar{b} - y_1) + \delta \end{aligned} \quad (3.15)$$

RBR算法

算法

- 步1 给出 $\delta \geq 0$, $X^1 \succ 0$, $F^0 = \text{tr}(X^1)$, $F^1 = +\infty$, $\epsilon > 0$, 设置计数器 $k = 1$, $i = 1$;
- 步2 若 $\frac{|F^{k-1} - F^k|}{\max\{1, |F^{k-1}|\}} \leq \epsilon$, 则停止;
- 步3 若 $i > n$, 则令 $i = 1$, $X^{k+1} = X^k$, $k = k + 1$, $F^k = \text{tr}(X^k)$, 转步2;
- 步4 求出 i 对应的 α_i , β_i ;
- 步5 若 $|\alpha_i| = 0$, 令 $X_{\alpha, \alpha}^k = x_{\alpha, \beta}^l = X_{\beta, \alpha}^k = 0$, $X_{\beta, \beta}^k = X^k$, 否则按通常定义求出以上几个量.
- 步6 按(3.15), 计算当前最优解 ξ , y_1 , y_2 , 以及 $y = [y_1, y_2]$;
- 步7 令 $X_{i, i}^k = \xi$, $X_{i, i^c}^k = y$, $X_{i^c, i}^k = y^\top$;
- 步8 $i = i + 1$, 转步3;

FPC法

FPC法是一种基于不动点定理的算法, 可以解决问题(1.5).

$\|X\|_* + \frac{1}{2\mu}\|\mathcal{A}(X) - b\|_2^2$ 是一个凸函数, 求最优解只要求梯度为0的点. 但 $\|X\|_*$ 是不可微的, 故考虑次梯度

$$0 \in \mu\partial\|X\|_* + g(X) \quad (4.1)$$

其中 $g(X) = \mathcal{A}^*(\mathcal{A}(X) - b)$

设 $Y = X - \psi g(X)$, $\psi > 0$ 是给定常数, 则(4.1)等价于

$$0 \in \psi\mu\partial\|X\|_* + X - (X - \psi g(X)) = \psi\mu\partial\|X\|_* + X - Y \quad (4.2)$$

FPC法

(4.2)恰好是 $\psi\mu\|X\|_* + \frac{1}{2}\|X - Y\|_F^2$ 的次梯度, 即(1.4)等价于

$$\min \psi\mu\|X\|_* + \frac{1}{2}\|X - Y\|_F^2 \quad (4.3)$$

定义

对 $X \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 做奇异值分解, $X = U \text{Diag}(\sigma) V^\top$, $r = \text{rank}(X)$, $U \in \mathbb{R}^{m \times r}$, $V \in \mathbb{R}^{n \times r}$, 对 $\forall \nu > 0$, 定义向量 $\bar{\sigma} = (\bar{\sigma}_1, \dots, \bar{\sigma}_r)$, 其中 $\bar{\sigma}_i = \max\{\sigma_i - \nu, 0\}$.

*Shrinkage*算子 $S_\nu: \mathcal{R}^{m \times n} \rightarrow \mathcal{R}^{m \times n}$, $S_\nu(X) = U \text{Diag}(\bar{\sigma}) V^\top$

FPC法

定理

问题(4.3)中, 当给定 $Y \in \mathcal{R}^{m \times n}$, 最优解为 $S_{\psi\mu}(Y)$, 其中 $S_{\psi\mu}(\cdot)$ 是Shinkage算子

FPC法的收敛性

上面的定理告诉我们, 只要求出合适的 Y , $S_{\psi\mu}(Y)$ 就是(1.5)的解.

由 X 与 Y 的关系可以看出, 若 X^* 是(1.5)的解, 则

$$X^* = S_{\psi\mu}(X^* - \mu g(X^*)) = S_{\psi\mu}(X^* - \mu \mathcal{A}^*(\mathcal{A}(X^*) - b)) \quad (4.4)$$

即 X^* 是映射 $S_{\psi\mu} \circ h$ 的不动点, 其中 $h(X) = X - \mu g(X)$. 我们有如下的结论.

FPC法的收敛性

定理

*Shinkage*算子 $S_\nu(\cdot)$ 是非扩张的, 即

$$\|S_\nu(Y_1) - S_\nu(Y_2)\|_F \leq \|Y_1 - Y_2\|_F \quad (4.5)$$

定理

当 $\mu \in (0, 2/\lambda_{\max}(A^\top A))$, 其中 A 满足 $\mathcal{A}(X) = \text{Avec}(X)$, h 是非扩张的, 即

$$\|h(X_1) - h(X_2)\|_F \leq \|X_1 - X_2\|_F \quad (4.6)$$

FPC法的收敛性

自然的推论是, 当 $\mu \in (0, 2/\lambda_{\max}(A^\top A))$

$$\|S_{\psi\mu}(h(X_1)) - S_{\psi\mu}(h(X_2))\|_F \leq \|h(X_1) - h(X_2)\|_F \leq \|X_1 - X_2\|_F \quad (4.7)$$

即 $S_{\psi\mu} \circ h$ 是一个非扩张的映射, 由Brouwer不动点定理可知, 由任意 X 开始进行迭代, 都能收敛到某个不动点.

优化奇异值计算

实际计算中, 上述迭代过程中, 每步都要求做奇异值分解, 这并不是
一件容易的事. 我们认为问题(1.5)中的原矩阵 X 是一个低秩矩阵,
那么其奇异值大多都是 0, 故可以考虑只求很少的几个奇异值.

这种优化FPC法中奇异值计算的方法, 就是FPCA法.

优化奇异值计算

$A \in \mathbb{R}^{p \times q}$, 取整数 $c, d, 1 \leq d \leq c \leq q$, (P_1, \dots, P_q) , $P_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^q P_i = 1$. 构造随机向量 (i_1, \dots, i_c) , $P(i_t = j) = P_j$, $t \in \{1, \dots, c\}$, $j \in \{1, \dots, q\}$. 再令随机矩阵

$$C = \begin{pmatrix} C^{(1)} \\ \dots \\ C^{(c)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A^{(i_1)} / \sqrt{cP_{i_1}} \\ \dots \\ A^{(i_c)} / \sqrt{cP_{i_c}} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{p \times c} \quad (4.8)$$

优化奇异值计算

求 $C^\top C$ 的特征值分解

$$C^\top C = \sum_{i=1}^c \sigma_i^2(C) y_i y_i^\top \quad (4.9)$$

其中 $\sigma_i(C) \geq 0$ ，为 C 的奇异值，再构造矩阵

$$H = \begin{pmatrix} H^{(1)} \\ \dots \\ H^{(d)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C y_1 / \sigma_1(C) \\ \dots \\ C y_d / \sigma_d(C) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{p \times d} \quad (4.10)$$

优化奇异值计算

令

$$A_d = H \text{Diag}(\sigma(C)) (A^\top H \text{Diag}(1/\sigma(C)))^\top \quad (4.11)$$

可以证明 A_d 是 A 的一个比较好的近似

$$\|A - A_d\|_\xi^2 \leq \min_{\text{rank}(D) \leq d} \|A - D\|_\xi^2 + \text{polylog}(d, 1/c) \|A\|_\xi^2 \quad (4.12)$$

其中 $\xi = 2$ 或 F , polylog 是多重对数函数.

FPCA算法

算法

步1 给出 X^1 , $\mu^0 > 0$, $1 > \theta > 0$, $\epsilon > 0$, 设置计数器 $k = 1$;

步2 若 $\mu^k = \mu^{k-1}\theta \leq \epsilon$, 则停止;

步3 选取合适的 $\psi > 0$;

步4 计算 $Y^k = X^k - \psi \mathcal{A}^*(\mathcal{A}(X^k) - b)$;

步5 选取合适的 d , $\{P_i\}$, 按(4.8)至(4.11), 计算近似的奇异值分解 $Y_d = H \text{Diag}(\sigma(C)) (Y^\top H \text{Diag}(1/\sigma(C)))^\top$

步6 计算 $X^{k+1} = S_{\psi\mu^k}(Y_d)$;

步7 $k = k + 1$, 转步2;

FPCA对比SDPT3

TABLE I
NUMERICAL RESULTS FOR FPCA AND SDPT3
($p = q = 100, m = 2000, SR = 0.2$)

Problems		FPCA			SDPT3		
r	FR	NS	time	rel.err.	NS	time	rel.err.
1	0.0995	50	4.93	5.80e-6	47	15.10	1.55e-9
2	0.1980	50	5.26	6.10e-6	31	16.02	7.95e-9
3	0.2955	50	5.80	7.48e-6	13	19.23	1.05e-4
4	0.3920	50	9.33	1.09e-5	0	—	—
5	0.4875	50	5.42	1.61e-5	0	—	—
6	0.5820	50	7.02	2.62e-5	0	—	—
7	0.6755	49	8.69	7.69e-5	0	—	—
8	0.7680	32	10.94	1.97e-4	0	—	—
9	0.8595	1	11.75	4.38e-4	0	—	—
10	0.9500	0	—	—	0	—	—

FPCA对比SVT(简单情况)

TABLE II
COMPARISON OF FPCA AND SVT ON EASY PROBLEMS

Problems	FPCA		SVT	
(p, r, SR, FR)	rel.err.	time	rel.err.	time
(100, 10, 0.57, 0.34)	4.27e-5	0.39	1.64e-3	30.40
(200, 10, 0.39, 0.25)	6.40e-5	1.38	1.90e-4	9.33
(500, 10, 0.20, 0.20)	2.48e-4	8.01	1.88e-4	23.77
(1000, 10, 0.12, 0.17)	5.04e-4	18.49	1.68e-4	41.81
(1000, 50, 0.39, 0.25)	3.13e-5	120.64	1.63e-4	228.79
(1000, 100, 0.57, 0.33)	2.26e-5	177.17	1.71e-4	635.15
(5000, 10, 0.02, 0.17)	1.58e-3	1037.12	1.73e-4	121.39
(5000, 50, 0.10, 0.20)	5.39e-4	1252.70	1.59e-4	1375.33
(5000, 100, 0.16, 0.25)	2.90e-4	2347.41	1.74e-4	5369.76

FPCA对比SVT(复杂情况)

TABLE III
COMPARISON OF FPCA AND SVT ON HARD PROBLEMS

Problems	FPCA		SVT	
(p, r, SR, FR)	rel.err.	time	rel.err.	time
(40, 9, 0.5, 0.80)	1.21e-5	5.72	5.01e-1	3.05
(100, 14, 0.3, 0.87)	1.32e-4	19.00	8.31e-1	316.90
(1000, 20, 0.1, 0.40)	2.46e-5	116.15	—	—
(1000, 30, 0.1, 0.59)	2.00e-3	128.30	—	—
(1000, 50, 0.2, 0.49)	1.04e-5	183.67	—	—

RBR

TABLE IV
NUMERICAL RESULTS FOR THE RBR METHOD

seed	$\epsilon = 10^{-1}$			$\epsilon = 10^{-4}$		
	rel.err.	time	cycle	rel.err.	time	cycle
p=q=100; r=10; m=9500; SR=0.95						
68521	1.7e-6	0.5	8	3.3e-7	2.8	42
56479	8.4e-7	0.5	8	3.0e-7	2.4	35
115727	1.3e-6	0.5	8	3.4e-7	2.4	37
27817	1.2e-6	0.5	8	3.2e-7	2.8	42
9601	1.1e-6	0.6	8	3.1e-7	2.7	40
p=q=300; r=10; m=29500; SR=0.33						
68521	1.0e-4	3.3	9	2.0e-7	21.7	59
56479	1.0e-4	3.3	9	2.0e-7	20.8	56
115727	9.4e-5	3.3	9	2.0e-7	24.7	67
27817	9.7e-5	3.3	9	2.0e-7	10.4	28
9601	1.0e-4	3.3	9	1.9e-7	9.5	26
p=q=500; r=10; m=49500; SR=0.20						
68521	2.4e-4	9.1	9	1.7e-7	56.0	56
56479	1.1e-4	8.9	9	1.6e-7	53.7	53
115727	1.1e-4	9.4	9	1.6e-7	49.8	48
27817	3.3e-4	9.1	9	1.6e-7	53.6	53
9601	1.1e-4	9.9	9	1.6e-7	54.9	53

Thank you!