

Curvelet 域垂直地震剖面波场分离

包乾宗, 高静怀, 陈文超

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对垂直地震剖面(VSP)资料处理中上下行波重叠难以分离的问题,提出了一种基于奇异值分解(SVD)和 Curvelet 变换相结合的分离上下波方法. 首先基于数据中随机噪声是统计平稳的假设,在 Curvelet 域通过分尺度选取阈值压制随机噪声,再利用奇异值分解方法滤除部分下行波能量,最后根据 VSP 资料中上下行波在 Curvelet 域分布区域不同,进行上下行波场分离. 合成和实际资料处理结果表明,该方法与 $f-k$ 滤波方法和 SVD 方法相比,不仅提高了信噪比,而且减弱了边界上的波形畸变,得到了更好的分离效果.

关键词: 垂直地震剖面; Curvelet 变换; 波场分离; 阈值

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)06-0650-05

Wave Field Separation of Vertical Seismic Profiling in Curvelet Domain

Bao Qianzong, Gao Jinghuai, Chen Wenchao

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To separate the up-going and down-going waves in data processing of vertical seismic profiling, a method of wave field separation is proposed based on a combination of singular value decomposition (SVD) and Curvelet transform. Firstly, based on the assumption that random noise in data is stationary in statistics, the threshold on scale of Curvelet domain is selected for attenuation of random noise. And then, SVD method is used to filter part of down-going wave energy. Finally, the wave field separation is done because up-going wave and down-going wave will be located in different region of Curvelet domain. The results of synthesized and real data show that the method can improve signal-to-noise ratio, and can weaken the malformation of waveform on boundary. The method can gain better wave field separation result than $f-k$ filter method and SVD method.

Keywords: vertical seismic profiling; Curvelet transform; wave field separation; threshold

垂直地震剖面 (Vertical Seismic Profiling, VSP) 方法是与地面地震方法相对的一种探测方法. 在 VSP 原始资料中除上行波外, 还包含下行波, 并且上行波和下行波互相重叠在一起, 因此有效地分离上行波和下行波是 VSP 资料处理的一项基本任务. 只有正确的识别、分离和提取上行波和下行波, 才能充分利用 VSP 的有用信息, 补充地面勘探的不足, 为构造勘探、岩性勘探和油气开发服务. 通常采用的分离方法有中值滤波和 $f-k$ 滤波^[1].

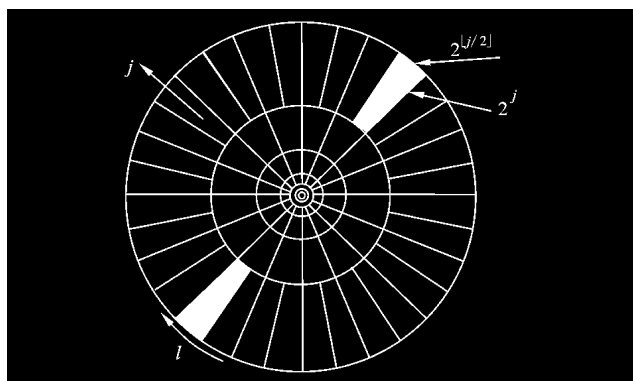
近年来, 在调和与分析领域 Candes 和 Donoho 提出了一种 Curvelet 紧标架^[2-3], 它能对边缘为分段二阶连续可微的函数进行稀疏表示, 同时具有多尺度和多方向特性. 如果一种变换对信号越能稀疏表示, 就越有利于信号去噪和分离. 目前, Curvelet 变换已经被用于图像去噪和增强处理等领域^[4-5], 而在地震数据中的应用正处于起步阶段, Herrmann 等人^[6]和国内的张素芳等人^[7]将其用于地震资料多次波衰减中, 但在处理过程中一次波要满足能量最小

的假设条件.

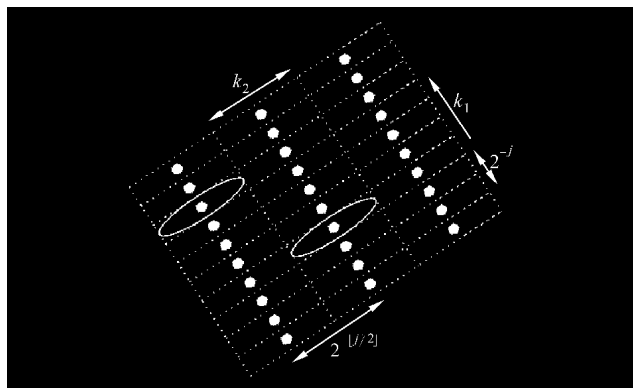
本文首先对 Curvelet 变换进行直观分析,然后针对 VSP 资料处理中上下行波重叠难以分离的问题,提出一种基于奇异值分解(SVD)和 Curvelet 变换相结合分离上下行波的方法.该方法在基于数据中噪声是统计平稳假设的前提下,不仅可以有效地分离上下行波,同时可以很好地抑制随机噪声.

1 Curvelet 变换^[2-3]

在小波理论中,一维信号可以分解在时间轴和频率轴同时具有局部化性质的小波标架上,小波标架可以通过伸缩因子和平移因子生成,而 Curvelet 变换则是小波变换的二维各向异性扩展,它和小波变换相似,也可以进行平移和伸缩.但是,由于 Curvelet 变换是在二维情况下分解,因此平移应由 2 个因子决定. Curvelet 变换和小波变换的主要不同在于 Curvelet 变换具有旋转特性,一个 Curvelet 由 4 个因子 (j, l, k_1, k_2) 唯一确定,其中 j 为伸缩因子, l 为旋转因子, k_1 和 k_2 为平移因子,这些决定因子与 Curvelet 族在空间域和频率域的关系如图 1 所示.



(a)频率域



(b)空间域

图1 Curvelet 的覆盖原理

Curvelet 的构造由以下步骤组成.首先利用带通滤波将二维傅里叶谱分解为二进子带,每个子带再分解为角楔形,其中角楔形数量由每个子带的尺度因子决定(见图 1a),随后对每个楔形乘以能覆盖其紧支撑的二维傅里叶基.在空间域中,与该傅里叶基对应的空间覆盖方向由角楔形决定(见图 1b).在 Curvelet 构造过程中子带滤波显示了 Curvelet 的多分辨特性,在每个子带中所分解的角楔形说明了其方向性.通过以上分析可以看出, Curvelet 实质上是相空间的一个海森堡原子.

Curvelet 在傅里叶域满足一种各向异性关系:宽度是长度的平方,即抛物尺度关系.该关系显示了传统二维连续小波变换和 Curvelet 变换之间的差异. Curvelet 在频率域的角楔形长度为 2^j ,宽度为 $2^{[j/2]}$ ($[\cdot]$ 表示下取整).因此,在空间域沿一个方向是振荡的,而在其正交方向上是光滑的.

给定一个 Curvelet,经过伸缩、平移和旋转可以生成 $L^2(\mathbf{R}^2)$ (平方可积函数空间)的紧标架,这就意味着它具有重构公式

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{\mu=M} \langle f(\mathbf{x}), c_{\mu} \rangle c_{\mu} \quad (1)$$

式中

$$\langle f(\mathbf{x}), c_{\mu} \rangle = \int_{\mathbf{R}^2} f(\mathbf{x}) c_{\mu}^*(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (2)$$

其中 $\langle f(\mathbf{x}), c_{\mu} \rangle$ 是函数 $f(\mathbf{x})$ 的 Curvelet 系数, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示 $L^2(\mathbf{R}^2)$ 中的内积, c_{μ} 表示由多指标 $\mu = (j, l, k_1, k_2)$ 确定的 Curvelet 族^[3], M 是指标集,上标 $*$ 表示复共轭.由此可以得到,任意函数 $f(\mathbf{x}) \in L^2(\mathbf{R}^2)$ 可以表示为 Curvelet 族中元素的叠加.

2 波场分离的 Curvelet 变换方法

VSP 资料和地面地震资料一样,不仅含有规则干扰,也有随机干扰,因此在分离上下行波过程中进行随机噪声衰减,可以得到更好的分离效果.由于 VSP 资料中上下行波具有不同的视速度,因此在 Curvelet 域中,它们出现在不同区域.对于资料中的随机噪声,本文采用阈值方法滤除.波场分离方法主要由以下 4 个步骤组成:①对原始地震记录做 Curvelet 变换;②在 Curvelet 域利用阈值方法滤除随机噪声;③利用上下行波同相轴方向的不同进行波场分离;④做反 Curvelet 变换得到上行波和下行波.

2.1 随机噪声衰减

对于一条 VSP 数据 d ,设 s 为上行波和下行波信号, n 为随机噪声,则该数据可以表示为

$$d = s + n \quad (3)$$

可以通过下列方法得到信号估计

$$\tilde{s} = C^{-1} S_{CT}(Cd) \quad (4)$$

式中: C 为 Curvelet 变换; C^{-1} 为逆 Curvelet 变换; S_{CT} 为阈值函数, 其定义为

$$S_{CT}(C_\mu) = \begin{cases} C_\mu, & |C_\mu| \geq m \sigma_\mu \sigma \\ 0, & |C_\mu| < m \sigma_\mu \sigma \end{cases} \quad (5)$$

其中 C_μ 为原始的 Curvelet 系数, m 为与尺度相关的常数, σ_μ 为 Curvelet 域中噪声标准差, σ 为噪声标准差.

2.2 上下行波分离

对一条 VSP 记录 s , 设 w_d 为下行波, w_u 为上行波. 如果不考虑其他噪声, 实际记录可以表示为

$$s = w_d + w_u \quad (6)$$

由于 Curvelet 变换为线性变换, 则在 Curvelet 域的表达式为

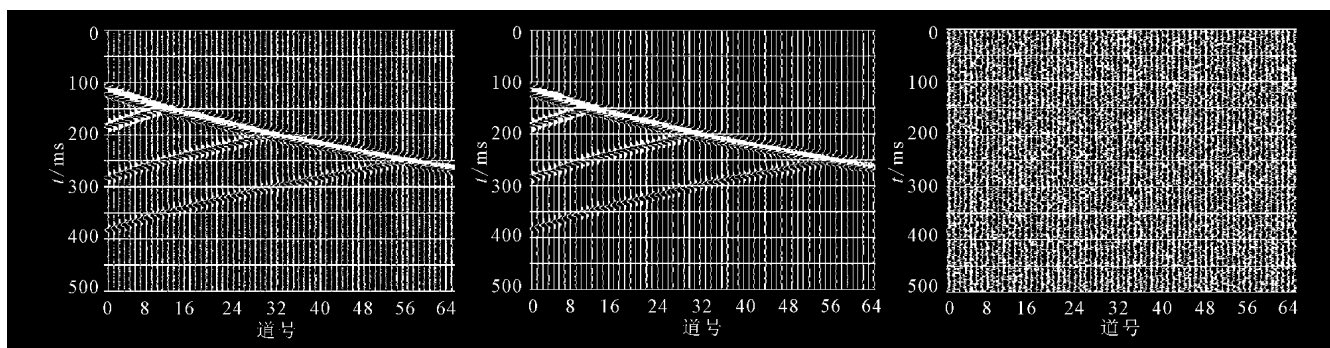
$$s_C = w_{d,C} + w_{u,C} \quad (7)$$

式中: s_C 、 $w_{d,C}$ 、 $w_{u,C}$ 分别表示 s 、 w_d 、 w_u 的 Curvelet 变换. 在原始记录中, 上行波和下行波叠加在一起, 并且下行波能量远强于上行波. 在 Curvelet 域下行波信号能量主要集中在正角度区域, 而上行波信号能

量主要集中在负角度区域, 由于下行波强能量的影响, 使得分离过程中常常产生信号畸变. 为了克服此影响, 首先对 VSP 记录利用 SVD 方法弱化下行波强能量的影响, 然后进行 Curvelet 域分离能取得比较好的效果.

3 数值结果

首先对合成记录数据进行实验, 其中图 2 为 4 层地质模型合成的垂直地震剖面记录. 在理论合成记录中加入独立恒等分布的高斯白噪声, 使其信噪比为 20.134 7 (见图 2a), 经过 Curvelet 变换阈值去噪后, 信噪比提高为 27.365 1 (见图 2b), 图 2c 为提取的噪声. 图 3 为记录中第 4 道去噪前后数据和合成数据的对比, 从图 3 可以看出, 噪声得到了明显压制. 图 4 为对图 2a 记录数据利用不同方法经过上下行波场分离提出的上行波. 从图 4a 和图 4b 中可以看到, SVD 和 $f-k$ 滤波方法可以提取上行波, 但是利用 SVD 方法后上行波同相轴的起始点存在变形, 而 $f-k$ 方法分离后还存在下行波的影响, 同时在边界会产生假象. 从图 4c 中可以看到, 本文采用 SVD

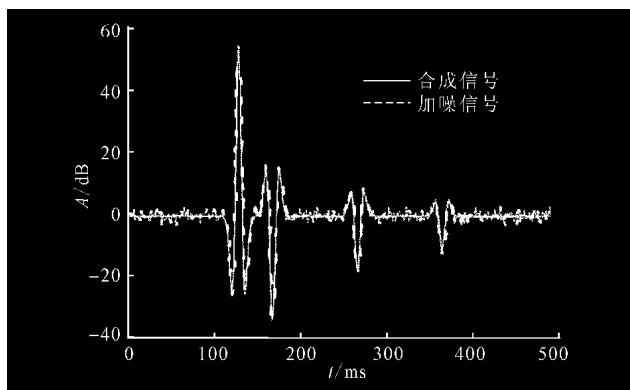


(a) 含噪合成资料

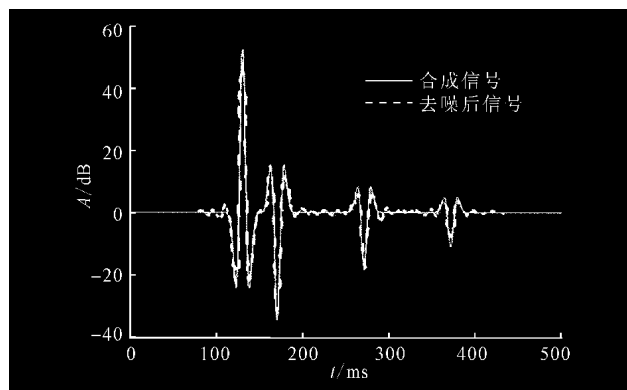
(b) 去噪后资料

(c) 提取的噪声

图2 合成数据去噪处理结果



(a) 去噪前



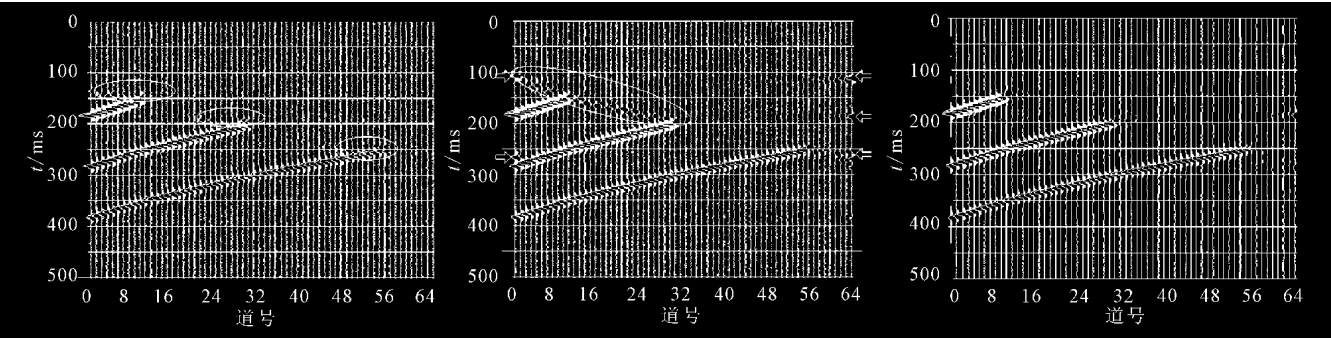
(b) 去噪后

图3 第4道去噪前后数据与合成数据的对比

与 Curvelet 变换相结合的方法不仅可以有效地压制随机噪声,而且能高精度地分离上下行波,剖面不存在明显的畸变现象.

图 5 是对实际垂直地震剖面数据进行处理的结果.这里利用原始数据初至之前噪声作为随机

噪声的估计样本进行随机噪声衰减的阈值估计.从图 5d 中可以看出,采用 $f-k$ 方法提取的上行波存在明显的边界影响.由图 5b 和图 5c 的结果可以看出,利用本文方法可以使上下行波得到很好地分离,边界影响减弱,同时随机噪声也得到了比较好地压制.

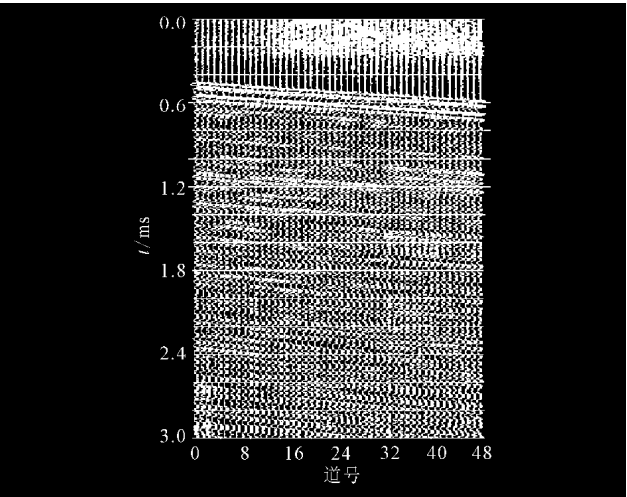


(a)SVD 方法

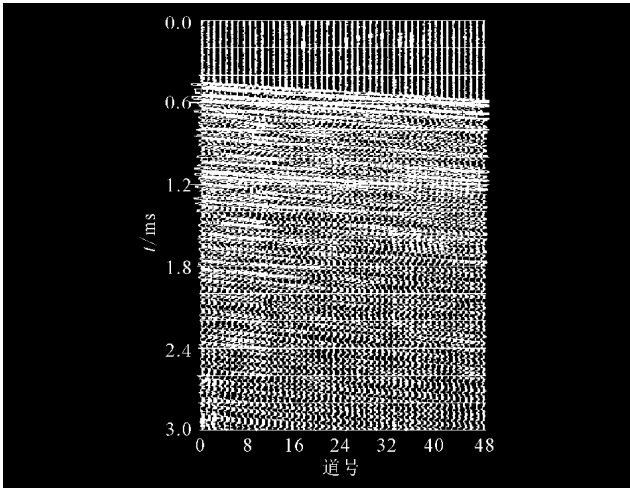
(b) $f-k$ 方法

(c)本文方法

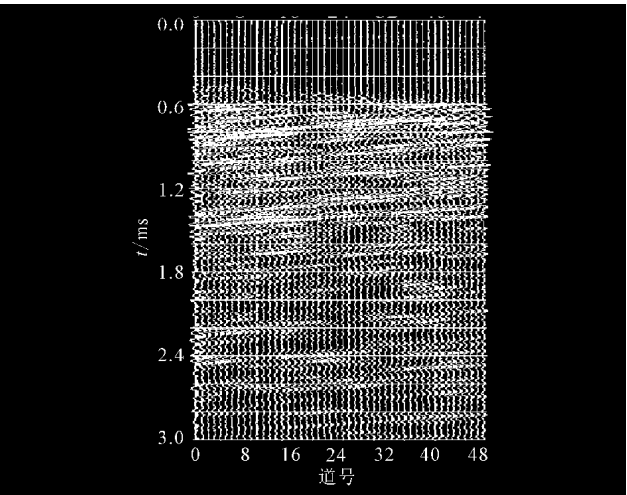
图 4 3 种不同波场分离方法提取的上行波



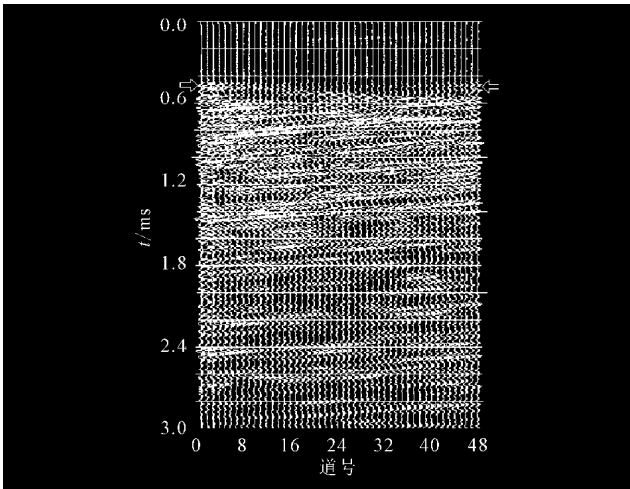
(a)原始记录



(b)采用本文方法提取的下行波



(c)采用本文方法提取的上行波



(d)采用 $f-k$ 方法提取的上行波

图 5 实际资料处理结果

尽管在理论模型的试算和实际资料处理中证明了本文方法的可行性和有效性,但与传统方法一样,本文方法在处理实际资料时 also 存在着不足:在利用阈值方法去噪时,由于实际数据中噪声并不是均匀同分布的高斯噪声,会导致阈值估计不准确,如果估计的阈值太小,会使去噪效果不理想;阈值太大,则有效信号会被滤除掉。在本文方法中,联合 SVD 主要是为了压制部分下行波能量。在实际数据处理中,由于井中环境和震源不一致而在资料中产生能量突变道,这样利用 SVD 方法会使同相轴波形发生变形,影响 VSP 资料的后续处理和准确解释。

4 结束语

本文提出了一种基于 Curvelet 变换的 VSP 上下行波分离方法,首先通过理论分析确定该方法的可行性。进一步研究表明,利用 SVD 和 Curvelet 变换结合进行上下行波分离会得到更好的效果,同时利用 Curvelet 阈值方法可以有效地压制随机噪声。通过对合成数据和实际数据处理以及与传统方法的对比,进一步证明了本文方法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 朱光明. 垂直地震剖面方法[M]. 北京:石油工业出版社,1988.
- [2] Candes E J, Donoho D L. New tight frames of Curvelets and optimal representations of objects with C^2 singularities [J]. Comm on Pure and Applied Mathematics, 2004, 57(2):219-266.
- [3] Candes E J, Demanet L, Donoho D L, et al. Fast discrete Curvelet transform [EB/OL]. (2005-07-01) [2006-02-13]. <http://www.acm.caltech.edu/~emmanuel/publication.html>.
- [4] Starck J L, Candes E J, Donoho D L. The Curvelet transform for image denoising [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(6):670-684.
- [5] Starck J L, Murtagh F, Candes E J, et al. Gray and color image contrast enhancement by the Curvelet transform [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(6):706-716.
- [6] Herrmann F J, Verschuur E. Curvelet-domain multiple elimination with sparseness constraints[C]// Expanded Abstracts of SEG 74th Annual Meeting. Denver, USA: Society of Exploration Geophysicists, 2004: 1333-1336.
- [7] 张素芳, 徐义贤, 雷栋. 基于 Curvelet 变换的多次波去除技术[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(3):262-265. Zhang Sufang, Xu Yixian, Lei Dong. Multiple-eliminated technique based on Curvelet transform [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(3):262-265.

(编辑 刘杨)

[文摘预登]

Log-Gabor 滤波和特征融合的虹膜识别研究

王风华, 韩九强

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

针对 Gabor 滤波器在提取虹膜纹理特征时带宽受限制的问题,提出了一种 Log-Gabor 滤波器结合特征融合的虹膜识别方法。该方法利用多尺度多方向二维 Log-Gabor 滤波器构成的多通道滤波器提取虹膜纹理特征,在特征层利用幅值信息对同尺度下多方向的 Log-Gabor 特征进行融合,以压缩冗余信息及去除非有效特征,然后对融合后的特征进行相位编码,并运用加权海明距离进行匹配,匹配时借助噪声屏蔽码去除眼睑遮挡干扰。同时,提出一种虹膜图像质量评价方法,可有效鉴别不适于识别的低质量虹膜图像。该识别方法与传统的 Gabor 方法相比,能得到更小的等错误率和相同错误接收率下更小的错误拒绝率,同时又将虹膜特征码的大小压缩为传统方法的 1/2,可提高匹配速度及节约存储空间。在 CASIA 和 UBIRIS 虹膜库的实验结果表明,所提方法的等错误率及错误接受率为 0.01% 和 0.1% 时的错误拒绝率分别比传统方法平均降低了 0.25%、0.57% 和 0.36%,而特征码的大小为 128 B,比传统方法减小了 50%。