

# HVS 模型及其在静止图象压缩质量评价中的应用

曹圣群 黄普明

(西安电子科技大学, 西安 710071)

鞠德航

(中国航天科技集团 504 所微波技术国防重点实验室, 西安 710000)

**摘要** 图象质量尺度是最优化图象压缩算法参数和提高图象质量的重要依据. 建立在人类视觉模型(HVS)基础之上的感知质量尺度作为主客观联系的桥梁, 能有效地反映出人对图象失真在视觉上的感知. 近年来, 有许多研究者借助人类视觉系统研究中的最新成果, 深入分析了与图象质量密切相关的视觉感知特性, 提出了大量效果不错的静止图象压缩感知质量尺度, 并对视觉感知特性在图象质量尺度中的应用方法进行了较全面的综述, 揭示了影响其图象质量预测准确性、鲁棒性的主要因素, 给出了该领域的最新研究成果和未来发展方向.

**关键词** 计算机图象处理(520·6040) 图象质量评价 图象压缩 视觉感知 人类视觉系统(HVS) 图象质量尺度  
**中图法分类号**: TP391 TN919.81 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)04-0379-08

## Human Visual System Models for the Quality Assessment of the Still Image Compression

CAO Sheng-qun, HUANG Pu-ming

(XiDian University, Xi'an 710071)

JU De-hang

(Xi'an Institute of Space Radio Technology, CAST, Xi'an 710000)

**Abstract** Image quality metric could be utilized to optimize the image compression algorithm and improve the image quality. Perceptual quality metric, based on the foundation of human visual system (HVS), can be used as a kind of closed connection between subjective assessments and objective assessments and reflects the human's visual sense to the image distortion. In recent years, the visual perception characteristics in relation to image quality closely has been researched thoroughly by means of some new progress in HVS, and a lot of perceptual quality metrics on the still image compression which all sound effectively have been proposed. An almost comprehensive survey of the different application of the visual perception characteristics in perceptual quality metric is presented in this paper, the important factors to predict the image quality accurately and robustly is given and the research achievement is summarized in this field. However, the development of computational HVS-models is still in its infancy, and many issues remain to be investigated and solved. First of all, more psychophysical experiments need to be done with natural images for the modeling of more complex phenomena that occur in natural images. Secondly, more psychophysical experiments focus on measurements at the supra-threshold also need to be done because quality metrics and compression are often applied above threshold. Finally, HVS-models would be expressed by analysis functions with the aid of latest mathematic pay-off in order that the general image quality metrics are developed.

**Keywords** Computer image processing, Image quality assessment, Image compression, Visual perception, Human visual system(HVS), Image quality metric

## 0 引言

长期以来, 在图象压缩编码技术研究中, 由于对人的视觉系统的性能还没有充分掌握, 对压缩恢复图象质量的评价广泛采用主观评价与图象逼真度描述方法. 对于主观评价方法而言, 因为人眼是信息的最终接收者, 由人作为图象的观察者, 对图象质量作出

主观判断, 如 MOS, 能够反映压缩算法引入失真的可见程度, 因而图象质量预测准确性较高. 但是, 这种方法既费时、费力, 又受到观察者背景知识、观测动机、观测环境等等其他因素的影响, 所得结果重复性及确定性较差. 图象逼真度描述, 如均方误差(MSE)或峰值信噪比(PSNR), 是对原始与恢复图象之间误差的简单数学统计, 虽能将误差量化表达, 却不能真实反映图象的视觉感知质量, 其准确性相对较差. 试验表

明,相关系数 MSE/MOS 仅为  $0.4 \sim 0.7^{[1]}$ 。

过去有些研究者试图用人类视觉系统(HVS)的某些特性,如 CSF(对比度敏感函数)或空间掩盖效应对这些客观评价尺度进行修改,如加权信噪比(WSNR)<sup>[2]</sup>、归一化均方误差(NMSE)<sup>[3]</sup>。由于这些方法只是粗略应用了部分视觉特性,虽然结果与主观评价尺度的相关系数有所提高,但对不同类型的图象以及不同的编码器,它们还不具备足够高的图象质量预测精确度和鲁棒性,不是真正意义上的图象感知质量尺度。

自 20 世纪 70 年代初以来,人们开始关注并探索比较完整的 HVS 理论框架,力求寻找一种基于 HVS 的客观图象感知质量尺度,架起主客观联系的桥梁。进入 20 世纪 90 年代后,数字图象在许多领域获得了广泛的应用,为克服日益增长的巨大数据量与其存储、传输所占用的空间域、时间域和频率域资源有限的矛盾,低比特率有损图象压缩技术需求激增,而新算法所引入的失真更趋多样性、复杂化。与此同时,人们在神经生理学和心理生理学等方面对视觉系统功能的理解有了显著的进展,一大批 HVS 模型相继出现。相应地,各种图象感知质量尺度应运而生。其性能明显提高(与 MOS 的相关系数都在 0.8 以上)。它们作为图象压缩算法参数最优化和提高像质的目标函数,在各项具体应用中,正逐步取代传统的 MSE 或 PSNR。

## 1 HVS 模型及其视觉特性

上个世纪 60 年代,人们对 HVS 机理,特别是对视觉早期阶段的认识取得了突破。典型的 HVS 模型框架如图 1 所示。它包括与图象质量密切相关的 5 个主要视觉感知特性:亮度适应性、视觉感知在频率、方向上的多通道分解性、二维对比度敏感函数、视觉掩盖效应和误差总和。这一模型框架是对视觉早期信息处理阶段的模拟,即实际物理图象经人眼在视网膜处转换成化学信号或电信号,形成视网膜图象,再通过光神经纤维传送到外侧膝状体,进而到达初级视皮层,形成神经图象。



图 1 典型的 HVS 模型框图

### 1.1 亮度适应性

对人类视觉早期的研究发现,HVS 对刺激信号的响应不是取决于信号的绝对亮度,而是取决于该信号相对于背景亮度(或刺激信号平均亮度)的局部变化,即刺激信号的对比度。人眼主观上刚可察觉的最小亮度差,称为亮度的可见度阈值(threshold),可见度阈值与背景亮度间的关系的示意曲线如图 2 所示,对于不同的物理亮度水平,此阈值的响应曲线呈现分段、非线性特点(移变非线性),这就是人眼的亮度适应性,它产生的根源是视细胞非线性地把接收到的光信号转换成电信号。当背景亮度大于  $10\text{cd}/\text{m}^2$  时,亮度适应性可用著名的 Weber-Fencher 定律描述,阈值与背景亮度为对数非线性关系;当背景亮度处于  $10\text{cd}/\text{m}^2$  以下,阈值与背景亮度为平方根(或立方根)关系。由于感知亮度的非线性压缩作用,在高亮度区,视觉感知可以允许较大的图象误差,表现出亮度掩盖效应。

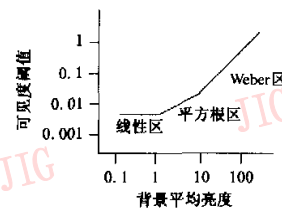


图 2 可见度阈值与背景平均亮度变化关系

### 1.2 视觉感知在空间频率、方向上的多通道分解

对初级视皮层细胞感受器实验测试显示,HVS 由相邻的多个并列视觉通道构成。这些通道的空间频率带宽约为一个倍频程,方向上的选择宽度在  $15^\circ \sim 60^\circ$  之间。它们具有线性或正交相位、位移不变性、一致的频率响应和多尺度性,对水平( $0^\circ$ )和竖直( $90^\circ$ )方向的刺激最敏感,而对对角方向敏感性逐渐减弱,在  $45^\circ$ (或  $135^\circ$ )方向处最不敏感。这一结构特征恰好与多分辨滤波器组或小波分解相匹配,使用视皮层变换<sup>[4]</sup>(cortex transform),即用一组可调的塔式多分辨滤波器建模,可对此进行有效的模拟,而如用小波变换实现,在实际应用中可取得较高的计算效率。

### 1.3 对比度敏感函数(CSF)

眼的光学系统特征以及视网膜等视觉处理过程的非线性与滤波效果,使得对比度阈值(contrast threshold)随刺激信号空间频率的不同而变化。对比度阈值的倒数,随空间频率变化的曲线称为对比度敏感函数(CSF,contrast sensitivity function),CSF 经

常被看作是视觉系统的调制传递函数(MTF),实际上,MTF对应的只是CSF中的线性滤波成分(光学系统特征)。由于CSF受到诸如方向性、亮度、图象大小及观察距离等多种因素的影响,准确的描述比较复杂<sup>[5]</sup>,因此在实际应用中,一般认为CSF是带通滤波函数,最大响应区在 $2\sim 10c/d$ (cycle/degree)。当观察距离增大时,低频段的失真将移向最大响应区,因此,CSF有时也采用低通滤波形式。

#### 1.4 掩盖效应

掩盖效应是指当另一信号出现在一刺激信号的背景中时,刺激信号的可视度降低(可见度阈值增加),也就是说,刺激信号在超阈值对比度背景下,会被掩盖掉。掩盖效应用阈值提升函数表示(TE, threshold elevation),即对比度阈值随背景对比度变化的关系曲线,取决于掩盖物的带宽、相位、方向以及观察者对掩盖物的熟悉程度。根据引发掩盖效应的起因,如强烈的局部对比度、边缘和局部活动性,把它区分为对比度掩盖、边缘掩盖与纹理(噪声)掩盖。由于纹理(噪声)比边缘结构复杂,相对于观察者而言,缺的先验信息更多,因此,纹理(噪声)区的掩盖效应强(TE曲线斜率增大),如图3所示, $C_{tho}$ 为引起阈值提升的对比度, $\epsilon$ 为TE曲线斜率。在图象质量评价中,当压缩恢复图象引入超阈值(Suprathreshold)失真时,还要注意“互掩盖效应”(mutual masking)现象。例如,在原始图象的纹理区域,由于压缩算法引入的失真,可能造成在恢复图象中对应区域的对比度降低,如果使用原始图象作掩盖处理,结果就有偏差。正确的方法是选取两幅图象中掩盖效应小的值作处理。

掩盖效应测定的正确与否很大程度上决定了图象感知尺度的应用效果。观察者对图象内容熟悉程度的不确定性以及掩盖效应非局部化的现象给问题的解决带来了困难。

#### 1.5 误差总和

利用视觉感知的多通道分解性对误差图象(原

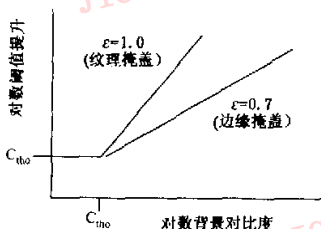


图3 空间掩盖所引起的阈值提升

始图象与恢复图象之差)进行处理后,将在每个通道形成一幅可视误差图。为减少信息冗余度,需要模拟视皮层信息合成的过程,把这多个通道误差图总和为一个。这个在二维空间频段上的误差总和图确定了误差出现在图象中的位置。如果需要,如与MOS作回归分析,还可在空间上把此误差图总和为一个感知质量评级的数字指标。

在对误差信号能量总和时,一般采用Minkowski和作为求和规则,其表达式为

$$M = \left( \sum_i |S_i|^{\beta} \right)^{1/\beta}$$

式中, $S_i$ 是空间上某一位置处某一视觉通道的响应, $\beta$ 是求和指数。当 $\beta=2$ 时, $M$ 为信号能量和;当 $\beta\approx 3.5$ 时, $M$ 为概率求和;当 $\beta=\infty$ 时, $M$ 为最大响应值。有资料表明<sup>[6]</sup>,当信号处于阈值附近时,该规则较有效地反映了视皮层中各通道响应的合成。

## 2 图象感知质量尺度

由于HVS模型的复杂性,研究者往往结合各自的应用领域,利用心理学测试结果,在HVS模型框架基础上,建立各种各样的视觉计算模型。这些模型有些是对HVS模型的简化,如合并、省略或简化表达部分视觉感知特性;有些是把HVS与误差的结构特性结合在一起考虑。按照图象感知质量尺度的发展历程及其特点,可把HVS模型归纳为3类:单通道HVS感知质量尺度、多通道HVS感知质量尺度和超阈值误差感知质量尺度。

### 2.1 单通道HVS感知质量尺度

图象质量评价中,最早采用的是单通道视觉计算模型,它把HVS看作为由CSF决定的单一空间滤波器。模型的输出是刺激信号的滤波结果,而检测能力取决于一个阈值判据。

1974年,Mannos&Sarkrisnon率先尝试在一个单通道视觉模型之上,建立了灰度图象感知质量评价的方法<sup>[7]</sup>。该方法首先利用光栅可视度试验,推导出HVS的某些特性,并得出与现在广泛使用的CSF较接近的表达式,然后把原始图象和恢复图象作输入,先做亮度非线性处理,再用CSF对它们滤波,最后以两幅输出图象间的平方差作为图象误差尺度。尽管这种方法比较简单,但这个质量尺度使人们首次认识到,把视觉科学应用到图象处理中的重要性。

此后,Hall&hall提出用一个低通与一个高通滤

波器级联来实现 CSF<sup>[8]</sup>,并在两个滤波器之间插入亮度非线性变换.这一方法试图模型化视觉心理生理学处理过程:低通滤波表示眼的光学系统特征;视网膜视觉感受器呈现亮度非线性;而高通滤波则由神经节细胞响应引起.然而这一分段级联滤波形式的 CSF 模型没有定论,未被采用在最近的 HVS 模型中.

Limb 提出了一种图象失真判据<sup>[9]</sup>,其视觉模型由亮度非线性、CSF、空间掩盖与误差总和等处理阶段组成,该方法研究了上述各部分不同的实现方式,如使用全局与局部掩盖,不同形状的 CSF 曲线以及不同的求和方法等,并把预测出的图象质量与主观 MOS 比较,选取最好的模型参数.研究显示:使用低通形式的 CSF、局部活动性掩盖和 2~3 个最大区域的误差求和时(相对于整个图象的误差平均而言),感知质量尺度可取得与 MOS 的最大相关性,相关系数比 MSE 有显著提高.但由于模型参数的选取依赖于 MOS 方法,因此在某种程度上受限于选定的测试图象与观察条件等.

Karanasekera&Kingsbury 提出了针对块化效应的失真测度<sup>[10]</sup>,此类失真常见于矢量量化和 DCT 编码中,他们先对人工合成的测试图象进行主观试验,然后通过调整边缘幅度、边缘长度、背景亮度和背景活动性 4 个参数,测出边缘损伤的视觉敏感度,并建立视觉模型.该方法的一个显著特点是模型参数的确定由超阈值试验得到,并以对超阈值的刺激反应时间来度量视觉敏感度.此外,模型中还包括亮度非线性、空间活动性掩盖效应和块边缘的误差平均.在对实际自然图象的检验中,作者设计了一些有相同的 MSE,但方块结构分布不同的图象,模型预测与主观测试吻合得很好.该算法后来还被推广用来测定振铃(ringing)和模糊(blurring)失真<sup>[1]</sup>.

显然,单通道视觉模型与 HVS 存在差异,其图象质量预测准确性有本身固有的局限性,但它们相对简单,便于计算,因此,许多经过心理学测试检验,性能有所改善的单通道感知质量模型仍获得广泛应用.

2.2 多通道 HVS 感知质量尺度

多通道感知质量模型建立在视觉感知多通道分解性基础之上,即图象被分解成一组独立的并行通道处理,CSF 仅是这些通道敏感度的包络,误差的可见度检测在各个通道中独立进行.由于这类模型成功地解释了视觉多分辨现象,因此图象质量预测的准确性比单通道模型方法明显改善.

最早的多通道图象感知质量尺度<sup>[11]</sup>是由

Sakrison 在 1977 年提出的.其基本思想是先对误差图象进行亮度对数非线性处理,再按不同的带宽和方向把它分解到一组通道中;然后利用简单刺激信号心理生理学试验获取的 CSF 与空间掩盖效应数据,对每个通道作阈值检测;最后对各通道中检测出的误差值求和,就产生了最终的可见度误差图.对此误差图在空间上求和还可得到一个用数量值表示的误差可见度.由于当时计算机处理能力有限,该方法既未实现,也未用主观数据验证其有效性.

随着计算机技术的发展与 Watson 视皮层变换<sup>[4]</sup>的提出,20 世纪 90 年代初,一大批较完整的多通道 HVS 计算模型先后推出,其中比较著名的是 VDP<sup>[15]</sup>(Visible Difference Predictor)和图象质量预测视觉模型<sup>[12]</sup>.这两个模型十分相似,对简单或复杂刺激信号的误差阈值可见度预测都适用.它们采用 CSF 滤波、方向性与倍频程带宽空间频率多通道分解、亮度掩盖效应、对比度掩盖效应、距离误差计算(如 Daly 利用心理测试函数把误差映射为概率)以及在空间频率上的误差总和等一系列线性或非线性的级联过程对视觉系统建模,并最终形成感知质量尺度——误差检测概率图 VDM(Visible difference map).它描述了在原始图象与恢复图象每个像素点位置间察觉差别的概率.其中,VDP 方法采用的视觉计算模型如图 4 所示.这两个模型的有效性已通过大量的心理生理学和生理学试验得以验证.据称,目前还不存在其他模型,能像它们一样,准确测定在视觉阈值附近的误差.美中不足的是,它们未考虑方向上的掩盖效应,即仅用单一方向上一个通道内的能量实现对比度掩盖,同时也未考虑在空间上采用合适的求和方法把 VDM 转化一个质量评级数.

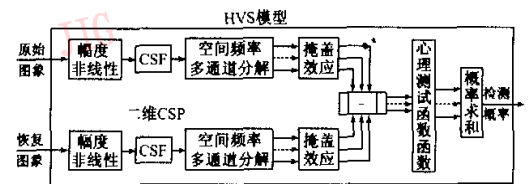


图 4 VDP 中的 HVS 计算模型

Westen 等提出另一种较完整的多通道感知质量尺度<sup>[13]</sup>.该尺度的视觉计算模型包括了前面讨论过的全部视觉感知特性,CSF 加权、亮度自适应(采用 LBC 算法<sup>[14]</sup>)、频率与方向上的多通道分解、类似于 Daly 使用的对比度掩盖和误差的 Minkowski 求和.它与以前模型的主要区别在于,在不同的方向

上采用不同的误差求和指数,这一点反映了最近在方向上对比度掩盖实验中揭示的某些结果。

Watson 提出了预测 JPEG 压缩图象质量的 DCTune 算法<sup>[15,16]</sup>。它与文献[5]和文献[12]中的模型不同之处是:用分块 DCT 基函数代替心理学测试中获取的滤波特性作频率多通道分解,并首先在空间上对误差求和。输出不是 VDM,而是一个  $8 \times 8$  矩阵,用于表示每一通道内误差的可视度,其优点是在一个量化矩阵中,允许对每一元素单独修改。整个图象的质量用具有最大可视度误差的通道表示,即误差在空间上的求和指数  $\beta = \infty$ 。后来的研究发现,当图象尺寸非常大时,这一质量尺度与主观评级相关性较差。另外,分块 DCT 基函数与 HVS 空间频率多通道分解不匹配,使得 DCTune 感知模型失去预测某些类型失真的能力,如不能预测振铃失真和块化效应失真等。

Eckert 对 DCTune 算法进行了修改<sup>[17]</sup>,建议使用 LOT(Lapped Orthogonal Transform)和小波变换替代 DCTune 中的线性滤波器组。改进后算法的性能虽有改善,但上述问题依然存在。

为在子带编码和小波压缩中引入感知质量评价尺度,文献[18]、[19]分别用相等带宽的子带编码滤波器与小波变换实现视觉模型频率多通道分解,其结果表明,小波变换方法改善了图象预测质量的可靠性。

多通道感知质量尺度还有很多,它们在使用 CSF 加权和亮度自适应方面差别不大;在实现多通道的频率与方向性分解时,有的使用固定带宽滤波器,

有的则使用倍频程带宽滤波器;有些有多个方向分解,有些则没有  $45^\circ/135^\circ$  方向上的分解等。而它们最大的区别在于,对比掩盖效应和误差总和实现方式的不同。这一点反映了在目前的心理生理学视觉模型中,对于这两个视觉特性的理解尚未达成一致意见。

### 2.3 超阈值误差感知质量尺度

上面讨论的单通道或多通道视觉感知质量尺度绝大部分只适用于误差在视觉阈值附近的情况。为了准确预测超阈值图象失真,如 JPEG 压缩中的块化效应、边缘附近的振铃失真等,有些研究者开始把视觉感知特性和各种误差对观察者的妨碍程度结合在一起考虑,初步建立起针对超阈值误差的感知质量尺度。

基于误差分割 (SEM, Segmentation-based error metric) 的评价方法<sup>[20]</sup>。其基本思想是将误差根据视觉感知差异分为表示边缘的误差(如模糊(blurring))、表示奇异性结构的误差(如块化效应(blocking))、以及剩余误差(如平坦区的自由噪声)3类。分割依据原始图象和恢复图象中的局部活动性来进行。其流程为:原始图象和恢复图象经过视觉预处理(Weber 定律和 MTF),相减得出误差,然后对此误差进行分类,分别对不同种类的误差进行视觉掩盖效应处理,得出 3 类误差各自的总和,最后与 MOS 进行回归分析。

Miyahara 等人经过多年研究,提出了编码图象的质量尺度<sup>[21]</sup>(PQS, Picture quality scale),其处理过程如图 5 所示。

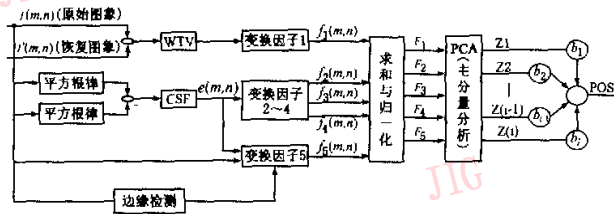


图 5 PQS 结构

先对误差信号进行预处理,  $F_1, F_2$  反映随机误差,  $F_3, F_4, F_5$  反映结构性误差,  $F_2, F_3, F_4$  中考虑了人的视觉感知,主要是辐度非线性、对比度敏感性和视觉阈值特性,  $F_5$  则进一步考虑了对比掩盖效应。通过主分量 (PCA) 分析,去掉失真因子间的相关性,得出了相关矩阵及特征值。误差信号的能量集中在 3 个最大的特征值上。然后再通过多重回归分析,得出与主观测试相吻合的计算结果。

### 3 结束语

虽然基于 HVS 模型的感知质量尺度与 MSE 相比,具有较高的质量预测精确度和一定的鲁棒性,但 HVS 计算模型还远未成熟,因而正在成为图象压缩方案性能评估与参数最优化最活跃的研究领域之一。

首先,需要深入开展心理生理学试验研究。一方面,采用复杂的自然图象取代简单的图案,如对

Gabor 光栅或噪声图案做 JND (Just Noticeable Difference) 测试, 确切掌握掩盖效应与误差总和特性; 另一方面, 把视觉阈值试验拓展到超阈值, 弄清更深层次的视觉特征, 如眼睛运动和视觉注意力, 进一步了解视觉过程存在的交织、反馈与控制机理。

其次, 努力借用最新的数学工具寻找模拟人眼视觉过程的解析表达式, 开发出通用的或是对某一

种用途适用的图象质量准则, 达到图象质量评价视觉计算模型的通用化与简洁化的要求。

图象感知质量尺度研究的发展日新月异, 它已向人们展示出勃勃生机, 表 1 总结了出现在文献中一些主要的静止图象压缩感知质量尺度, 藉此方便研究者查找、选择或修改与其具体应用相关的较合适的图象质量评价计算模型。

表 1 图象质量评价视觉计算模型总结表

分类	研究者	应用领域	亮度适应性变换	多通道分解线性变换	局部对比度	CSF	掩盖效应	误差求和规则	主观评价	备注	
单通道模型	Mannos & Sakrison 1974 <sup>[7]</sup>	IQ, IC	$L^{0.33}$			BF		$L_2$	R		
	Malo et al. 1997 <sup>[30]</sup>	IQ	?			F		$L_2$	R		
	Ngan et al. 1986 <sup>[24]</sup>	IC			yes	BF	C			DCT 编码	
	Hall & hall 1977 <sup>[8]</sup>	IC, IQ	LogL			LF+HF				CSF 两阶段实现模型	
	Girod 1989 <sup>[31]</sup>	IC			yes	BF	C	$L_2, L_\infty$		矢量量化	
	Lukas & Budrikis 1982 <sup>[29]</sup>	IQ			yes	LF	C	$L_p$		矢量量化	
	Limb 1979 <sup>[9]</sup>	IQ				BF	T	$L_2$			
	Griswold 1980 <sup>[22]</sup>	IC				BF		$L_2$			
	Nill 1985 <sup>[45]</sup>	IC				BF		$L_2$			
	Karunasekara & Kingsbury 1995 <sup>[19]</sup>	IQ		?		BF	T	$L_1$	R	可用于某些种类超阈值误差预测	
	Daly 1993 <sup>[5]</sup>	IQ	LogL/L <sup>1/3</sup>	Cortex transform			BF	C	PS	E	VDP 方法
	Lubin 1993 <sup>[12]</sup>	IQ		?	2DoG	yes	BF, W	C, T	$L_{2,4}$	R	
	Bradley 1999 <sup>[19]</sup>	IQ			DWT(DB9/7)		W	C	PS	E	VDP 的小波版本
	Teo & Heeger 1994 <sup>[34]</sup>	IQ			steerable pyr.			C( $\varphi$ )	$L_2$	E	对比度增益控制模型
	Winkler 2000 <sup>[39]</sup>	IC			steerable pyr.		W	C( $\varphi$ )	各种方式	R	矢量量化
多通道模型	Lal & Kuo 2000 <sup>[28]</sup>	IQ			yes	W	C( $f, \varphi$ )	$L_2$			
	Klein et al. 1992 <sup>[23]</sup>	IC		DCT		W		$L_2$		JPEG 量化矩阵设计	
	Hamada et al. 1999 <sup>[27]</sup>	IC		WHT			T		R	矢量量化	
	Westen et al. 1995 <sup>[13]</sup>	IQ, IC		?	yes	W	C	各种指数	R		
	Tong et al. 1998 <sup>[35]</sup>	IC	LogL	DCT			C, T		B		
	Bao & Leng 1998 <sup>[26]</sup>	IC		DWT		W	Edge			基于边缘的 HVS 模型	
	Nadenau & Reichel 2000 <sup>[32]</sup>	RA		DWT		F	C, T		B	掩盖效应模型比较	
	Eckert 1997 <sup>[17]</sup>	IC	?	DWT/DCT		W	C		B	DCT/DWT 比较	
	Jones et al. 1995 <sup>[38]</sup>	IC		DWT/DCT		W			B	DCT/DWT 比较	
	O'Rourke & Stevenson 1995 <sup>[33]</sup>	IC		DWT		W					
	Watson 1987 <sup>[36]</sup>	IC		Cortex transform				C	$L_4$	E	Cortex 变换
	Albanesi & Bertoluzza 1994 <sup>[37]</sup>	IC		DWT							基于 HVS 的 DWT 滤波器
	Watson 1995 <sup>[16]</sup>	IC	?	DCT		W	C	$L_4$			DCTune 算法
	Safraanek et al. 1990 <sup>[18]</sup>	IC		QMF	yes	W	T				经验掩盖模型
	Sakrison 1977 <sup>[11]</sup>	IC	LogL	yes	yes	BF	T	yes			早期的理论研究
其他	Miyahara et al. 1998 <sup>[21]</sup>	IQ	$L^{1/2.2}$			BF	Edge		R	可用于超阈值误差预测	
	Wen Xu & Hauske 1994 <sup>[20]</sup>	IQ	LogL			BF	Edge, T		R	可用于超阈值误差预测	

说明: IQ—图象质量; 2DoG—二阶高斯导数; pyr.—pyramid; LF—CSF 低通滤波; W—CSF 加权; C, 对比度掩盖; C( $\varphi$ )—跨方向上的对比度掩盖; R—主观评级; IC—图象压缩; DWT—离散小波变换; WHT—Walsh-Hadamard 变换; BF—CSF 带通滤波; F—CSF 滤波; PS—概率求和; C( $f$ )—跨频率的对比度掩盖; E—举例说明; RA—回归分析; DCT—离散傅氏变换; QMF—正交镜像滤波器; HF—CSF 高通滤波; T—纹理掩盖; ?—没有具体描述;  $L_p$ —Minkowski 和, 指数为 P; B—比特减小。

## 参 考 文 献

- 1 Wifried Osberger. Perceptual vision models for picture quality assessment and compression applications [D]. Queensland, Australia, Queensland University of Technology, 1999.
- 2 Hangai S, Suzuki K, Miyachi K. Advanced WSNR for coded monochrome picture evaluation using fractal dimension[A]. In: Proc. of PCS'94[C]. Sacramento, USA, 1994:92~95.
- 3 Marmolin H. Subjective MSE measures [J]. IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics, 1986, 16(3): 486~489.
- 4 Watson A B. The cortex transform: Rapid computation of simulated neural images [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1987, 39(3): 311~327.
- 5 Daly S. The visible differences predictor: An algorithm for the assessment of image fidelity [A]. In: Watson A B. Digital Images and Human Vision[M]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1993: 179~206.
- 6 Olzak L A, Thomas J P. Seeing spatial patterns[A]. Boff K R, Kaufman L, Thomas J P. In: Handbook of perception and human performance[M]. New York: John Wiley & Sons, 1986, 1: 7.1~7.56.
- 7 Mannos J L, Sakrison D H. The effects of a visual fidelity criterion on the encoding of images [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1974, 20(4): 525~536.
- 8 Hall C F, Hall E L. A nonlinear model for the spatial characteristics of the human visual system [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1977, 7(3): 161~170.
- 9 Limb J. Distortion Criteria of the Human Viewer [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9(12): 778~793.
- 10 Karanasekera L, Kinsbery N. A distortion measure for blocking artifacts in images based on human visual sensitivity [J]. IEEE Trans. on IP, 1995, 4(6): 713~724.
- 11 Sakrison D. On the role of the observer and a distortion measure in image transmission [J]. IEEE Trans. COM, 1977, 25(11): 1251~1267.
- 12 Lubin J. The use of psychophysical data and models in the analysis of display system performance [A]. In: Watson A B. ed. Digital Images and Human Vision[M]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1993: 163~178.
- 13 Westen S, Lagendijk R, Biemond J. Perceptual image quality based on a multiple channel HVS model [A]. In: ICASSP[C], Detroit, MI, USA, 1995: 2351~2354.
- 14 Peli E. Contrast in complex images [J]. Journal of the optical society of America A, 1990, 7(10): 2032~2040.
- 15 Watson A B. DCTune: A Technique for visual optimization of DCT quantization matrices for individual images [A]. In: Proc. of SID International Symposium Digest [C], Plava, Delreg, 1993. 24: 946~949.
- 16 Watson A B. Image data compression having minimum perceptual error [P]. U. S.: 5426512, 1995.
- 17 Eckert M. Lossy compression using wavelet, block DCT, and lapped orthogonal transforms optimized with a perceptual model [A]. In: Proc. of SPIE [C], Newport Beach, CA, USA, 1997, 3031: 339~350.
- 18 Safranek R, Johnston J, Rosenholtz R. A perceptually tuned sub-band image coder [A]. In: SPIE Proc. of Medical Image: Image Display [C], Santa Clara, CA, 1990, 1249: 284~293.
- 19 Bradley A P. A wavelet visible difference predictor [J]. IEEE Trans. On Image Processing, 1999, 8(5): 717~730.
- 20 Wen Xu, Hauske G. Picture quality evaluation based on error segmentation [A]. In: Proc of SPIE [C], Chicago, 1994. 2308: 1454~1465.
- 21 Miyahara M, Kotani K, Algazi V. Objective picture quality scale (PQS) for image coding [J]. IEEE Trans. Comm, 1998, 46(9): 1215~1226.
- 22 Griswold N. Perceptual coding in the cosine transform domain [J]. OPTICAL Eng., 1980, 19(3): 306~311.
- 23 Klein S, Silverstein A, Carney T. Relevance of human vision to JPEG-DCT compression [A]. In: Proc. of SPIE [C], 1992, 1666: 200~215.
- 24 Ngan K, Leong K, Singh H. Cosine transform coding incorporating human visual system model [A]. In: Proc of SPIE [C], 1986, 707: 165~171.
- 25 Nill N. A visual model weighted cosine transform for image compression and quality assessment [J]. IEEE Trans. COM, 1985, 33(6): 551~557.
- 26 Bao P, Leung B. Wavelet transform image coding based on fuzzy visual perception modeling [A]. In Proc. of the SPIE [C]. Bellingham, WA, USA, 1998, 3391: 649~658.
- 27 Hamada T, Miyaji S, Matsumoto S. Picture quality assessment system by three-layered bottom-up noise weighting considering human visual perception [J]. SMPTE J, 1999, 108(1): 20~26.
- 28 Lal Y K, Kuo C C J. A haar wavelet approach to compressed image quality measurement [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2000, 11(1): 17~40.
- 29 Lukes F X J, Budrikis E L. Picture quality prediction based on a visual model [J]. IEEE Trans. Comm, 1982, 30(7): 1679~1692.
- 30 Malo J, Pons A, Artigas J. Subjective image fidelity metric based on bit allocation of the human visual system in the DCT domain [J]. Image Vis. Comp., 1997, 15(7): 536~548.
- 31 Girod B. The information theoretical significance of spatial and temporal masking in video signals [A]. In: SPIE Proc. of Human Vision, Visual Processing and Digital Display [C], Los Angeles, 1989: 178~187.
- 32 Nadenau M, Reichel J. Image compression related contrast masking measurements [A]. In: SPIE Proc. of Human Vision and Electronic Imaging [C], San Jose, CA, USA, 2000, 3959: 188~199.
- 33 O'Rourke T, Stevenson R. Human visual system based wavelet

decomposition for image compression [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 1995, 6(2): 109~121.

- 34 Teo P C, Hecger D J. Perceptual image distortion[A]. In: Proc. ICIP[C]. Austin, TX, 1994, 2: 982~986.
- 35 Tong H H Y, Venetsanopoulos A N. A perceptual model for JPEG applications based on block classification, texture masking and luminance masking [A]. In: Proc. ICIP [C]. Chicago, Illinois USA, 1993: 428~432.
- 36 Watson A B. Efficiency of a model human image code [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, 4(12): 311~327.
- 37 Albanesi M, Bertoluzza S. Human vision model and wavelets for high-quality image compression [A]. In: Proc. of 5<sup>th</sup>. Int. conference in IEE Image Processing and its Application [C], Edinburgh, England, 1995: 311~315.
- 38 Jones P, Daly S, Gaborski R *et al*. Comparative study of wavelet and DCT decompositions with equivalent quantization and encoding strategies for medical images [A]. In: SPIE Proc. of [C]. San Diego, USA, 1995, 2431: 571~582.
- 39 Winkler S. Quality metric design: A closer look [A]. In: SPIE Proc of [C]. San Jose, CA, USA, 2000, 3959: 37~44.



**曹圣群** 1966年生,西安电子科技大学博士研究生,主要研究方向为遥感卫星应用技术、遥感卫星数据传输系统等。



**黄普明** 1971年生,中国航天科技集团504所数据传输与处理研究室主任,西安电子科技大学博士研究生,主要研究方向为遥感卫星数据压缩、纠错编码、信源信道联合编码等数据传输技术等。



**鞠德航** 1933年生,通信与电子系统博士生导师,中国航科集团504所研究员,西安电子科技大学和哈尔滨工业大学兼职教授,长期从事信息传输与处理研究工作。