

摘要

视觉是人类获取信息的关键途径，而视频是传播和呈现视觉信息的重要载体。视频编码技术通过将稀疏的视频数据压缩至紧凑的数据流中，让视频数据可以稳定高效的在有限的物理信道中进行传输。为了使用更少的比特代价表达更高质量的视频内容，视频编码技术在几十年的发展中形成了一代又一代先进的视频编码标准。在编码压缩倍率与视频数据量不断追逐的过程中，待处理的数据规模与编码计算的复杂度成倍增长，为实际生产和研究中计算资源有限的视频类应用带来了严峻的挑战。本文从视频编码技术出发，围绕着内容生产、信号传输和终端显示三个关键环节中速度、精度和成本限制导致的计算资源约束展开研究，探索对应约束下高效的视频编码方法，主要包含以下四个方面：

第一，提出了一种基于内容一致性的超高清视频快速编码模型，通过对混合视频编码框架中多元划分和模式决策的路径优化，实现了在不同计算资源和速度约束的条件下的高质量编码能力。具体来说，通过对原始信号在时空域上的特征分布建模，本文设计了一种编码模型的预分析优化方法。通过对不同划分类型、预测模式和编码工具集配置的优先级排序，实现了在不同速度约束下自适应的进行编码精度控制。结合已重建区域编码的先验信息，该方法可以在大幅降低编码决策数量的同时保持良好的编码性能。以 AVS3 标准为基础，本文进一步实现了一套高速实时的编码框架，形成了基于内容一致性的超高清视频快速编码模型。相比国际知名的快速视频编码器（x265 3.5），本文所提出的编码模型在快速编码场景下性能提升 12.99% 的同时速度提升 72%，同时具备了实时处理 8K 超高清视频数据的能力。在慢速编码等其他速度约束的条件中，本文编码模型相对 x265 编码器也展现出了不同程度的性能提升。

第二，提出了一种重建质量驱动的编码资源约束算法，通过对过饱和编码资源分配现象的抑制，实现了在编码精度有限的约束下对快速编码模型的性能提升。通过对直播场景低延时压缩的信号特征建模，实现了一种可以向码率控制模块中引入重建质量修正的反馈模型，将重建质量与最高目标质量的差值映射为编码参数的修正量，从关键帧周期上的码率控制模型参数和单帧编码过程中的量化参数两种粒度上对编码资源的分配进行约束。当指定最高目标质量为 42.5dB 时，本文所提出的编码资源约束算法可以在 CRF 码率控制模型上实现 18.69% 的编码带宽节省，同时不会破坏原有的 CRF 码率分配编码特性。主观质量的评估实验证明了本文所提出的方法几乎没有引入主观质量的损伤。

第三，提出了一种参考效率驱动的码率峰值约束算法，通过对低效编码帧的资源

分配优化降低了码率波峰的出现概率，实现了在资源分配精度有限的编码模型中对资源利用率的提升。通过分析压缩效率低下的关键帧在整个图像组中被帧间参考的选中概率，构建了图像组角度下关键帧的编码效率评估模型，进而针对低效的关键帧设计了一套自适应的量化参数修正步长推导的算法。该算法通过激发多层时域编码结构中帧间编码帧的参考代偿能力，在不影响编码性能的同时大幅降低关键帧的码率分配需求，进而降低码率峰值与谷值之间的差异提升信道整体的资源利用效率。在 AVS3 编码器上设计的低效编码帧资源约束实验显示，本文所提出的模型可以在 0.02% 的性能波动下实现 41.91% 的码率峰谷值波动降低。

第四，提出了一种面向显示流芯片的超低延时感知无损压缩模型，通过对低复杂度低延时的编码框架构建以及视觉无损的恒定码率资源分配模型的设计，实现了在显示流压缩场景下芯片级成本约束的高效编码。从传统高压缩比的重型编码模型研究经验出发，设计了一系列精简的预测-量化-系数编码框架，实现了在极低算力需求下对现有任意分辨率和采样比输入信号的高速并行处理。同时着重探索了在显示流信号压缩过程中感知无损的资源分配方法，在所述超低延时轻型视频编码框架上实现了一种主观无损的恒定码率资源分配模型。通过对输入信号编码复杂度的感知和定义以及对编码缓冲区负载的调配，实现了在超高清视频信号上的超低延时感知无损信号压缩。对比国际同类型最优的编码模型 DSC，本文所述模型以接近的硬件成本实现了更优的主观重建质量。

综上所述，本文围绕着计算资源约束的高效视频编码技术，针对不同资源约束下的快速编码模型和资源分配方法展开研究。通过将内容生产过程中的速度约束引入新一代视频编码模型，提出了一种可用于高速视频内容生产的超高清视频实时编码模型；通过将信号传输过程中的资源分配精度约束引入码率控制决策过程，提出了两种可以进一步提升快速编码模型性能的资源分配优化方法；最后在传统高压缩比编码模型设计和优化经验的基础上，通过引入显示流接口芯片的成本约束，提出了一种超低延时的感知无损压缩模型。本文系统性的研究了视频编、传、显过程中不同计算资源对信源编码的约束问题，并为超高清视频编码研究提供了新的思路。

关键词：视频编码，计算资源约束，快速编码，码率控制，显示流压缩