摘要

随着超高清、高帧率与沉浸式视频应用的快速发展，视频数据规模持续增长，给存储与传输带来了巨大压力。尽管以 H.266/VVC 和 AVS3 为代表的新一代视频编码标准在传统混合编码框架下不断引入更加复杂的编码工具，其压缩效率提升已逐渐面临边际收益递减的问题。近年来，深度学习在图像与视频处理领域取得了显著进展，为突破传统编码框架的性能瓶颈提供了新的技术路径。其中，神经网络滤波工具相较于其他编码工具对编码性能的提升更为直接有效，展现了较大的研究潜力。然而，现有的神经网络滤波工具的研究多聚焦于对环路滤波单一环节的局部优化，主要表现为对环路滤波工具的替换或扩充，缺少围绕混合智能编码框架中前处理、环路、后处理滤波任务的系统性分析与优化改进，因而难以从整体上提升率失真性能并推进标准化与应用落地。具体而言，编码前处理阶段缺乏对率失真信息的有效感知，环路滤波阶段对边信息的利用不充分，后处理阶段难以补偿丢失的高频细节，且缺少统一的标准化与应用平台。在此背景下，本文围绕面向混合智能编码的神经网络滤波方法研究这一核心问题，系统研究神经网络在视频编码前处理、环路滤波和后处理等关键环节中的建模方法，并提出面向标准化应用的高效混合智能编码框架。本文的主要研究内容与创新点总结如下：

第一，提出基于率失真感知的强化学习前处理滤波方法。针对传统前处理方法难以感知真实编码过程、不同编码内容与编码配置下泛化能力不足的问题，构建“前处理-编码反馈-策略更新”的闭环优化框架，将真实编码器作为环境引入强化学习训练过程，引入率失真反馈构建闭环优化机制，使前处理策略直接围绕实际码率与重建质量进行学习。进一步设计率失真模型引导的奖励建模策略与像素一致性约束，有效提升训练稳定性与策略有效性。实验结果表明，该方法在多种视频编码器（如 x265、VVenC 等）与不同编码配置下均取得超过 20% 的码率节省，最高支持 4K@60fps 实时推理，能够感知真实编码过程，具备良好的实时性与应用可行性。

第二，提出基于边信息指导的深度学习环路滤波方法。针对现有神经网络环路滤波对边信息利用不足、性能与复杂度难以兼顾的问题，系统挖掘预测信息、块划分信息与量化参数等编码边信息，并构建边信息指导与门控融合机制，结合多尺度 Transformer 主干网络与滤波强度自适应模块，实现对复杂压缩伪影的精细化抑制与多质量区间的统一建模。在此基础上引入知识蒸馏与轻量化设计，构建可在实际系统中实时部署的环路滤波模型，实验结果表明，该方法相比于 VVC 编码标准，在通测序列上平均取得 14.24% 的码率节省，轻量化方案在 CPU 环境下最高支持 4K@50fps 实时推理，进一步

推动了神经网络环路滤波工具的标准化与应用落地。

第三，提出基于重建信息引导的生成式后处理滤波方法。针对高压缩比场景下传统基于判别模型的滤波方法难以恢复真实纹理细节的问题，构建条件扩散生成框架，在重建帧约束下对原始图像分布进行概率建模，通过逐步去噪实现细节补偿与结构重建。进一步设计量化参数自适应调制机制与重叠块级推理策略，在保证生成质量的同时兼顾推理效率与应用可行性。实验结果表明，该方法能够有效恢复高频细节并抑制典型压缩伪影，相较 VVC 编码标准，在通测序列上 LPIPS 指标最高降低 0.09，验证了生成式方法在视频后处理场景中的应用潜力。

第四，构建面向下一代视频编码标准的高效混合智能编码框架。围绕高性能上限探索与轻量化实际应用两条路径，将强化学习前处理滤波、边信息指导的环路滤波等工具与传统混合编码体系高效结合，系统评估多工具组合的性能增益与复杂度代价，并验证在复杂度受限条件下的主观质量提升效果，编码性能提升最高超 30%，三次获得国际视频编码竞赛冠军，为神经网络编码工具与视频编码标准的标准化集成与实际部署应用提供方法与实证依据。

综上所述，本文围绕神经网络滤波方法在视频编码中的应用展开系统研究，从算法设计到应用实现进行了深入探索，为推动下一代视频编码标准的智能化发展提供了理论依据与实践参考。

关键词：视频编码，深度学习，前处理滤波，环路滤波，后处理滤波