arXiv:2602.06100v1 [eess.IV] 5 Feb 2026

面向节能视频编码的自适应分辨率与色度子采样

Amritha Premkumar*，Christian Herglotz*
*科特布斯-森夫滕贝格勃兰登堡工业大学计算机工程系，德国

摘要——**传统视频编码器通常采用固定的色度子采样格式（如 YUV420），这可能无法充分反映不同类型内容中色度细节的变化，进而导致色度质量不佳以及码率分配效率低下。我们提出自适应分辨率–色度子采样（ARCS）框架，通过联合优化空间分辨率和色度子采样，在感知质量与解码效率之间取得平衡。ARCS 针对每种比特率，通过最大化综合质量–复杂度目标，选择最优的（分辨率、色度格式）组合，同时施加单调性约束，确保不同表示形式之间平滑过渡。使用 x265 的实验结果表明，与固定格式编码（YUV444）相比，为达到相同的 colorVideoVDP 评分，ARCS 平均可节省**13.48%**的码率，并将解码时间缩短**62.18 %**；我们以解码时间作为解码能耗的替代指标。该框架将色度自适应引入节能视频流传输，作为一个新的控制维度。**

索引词—**色度子采样、节能视频编码、自适应流媒体、HEVC、率失真、感知质量**

I. 引言

全球对视频流媒体的需求持续增长，占消费者互联网流量的绝大部分 [1]。因此，在环境问题以及移动设备和嵌入式设备能源预算有限的双重驱动下，降低视频传输的能耗已成为一项亟待解决的研究挑战 [2]–[6]。近期研究探索了多种提升 HTTP 自适应流媒体（HAS）能效的途径，包括内容感知空间分辨率自适应 [7]–[10]，、可变帧率编码 [11]，[12],以及高效的逐标题码率梯度构建 [13]。

尽管这些方法已展现出显著优势，但它们有一个共同的局限：视频内容的色度表示几乎总是被视为固定不变。实际上，由于硬件支持广泛且所需比特率较低，大多数自适应流媒体管线都将 YUV420 色度子采样用作默认格式，尽管现代
编解码器支持更具表现力的色度子采样（例如，HEVC“Main”档次默认采用 YUV420）。尽管针对高动态范围（HDR）、广色域（WCG）和标准动态范围（SDR）内容的色度处理已有大量研究——例如加权色度下采样和亮度参考上采样 [14],HDR 色度子采样的主观与客观评估 [15], [16], 以及早期极低比特率色度编码策略 [17]——这一惯例仍然延续。

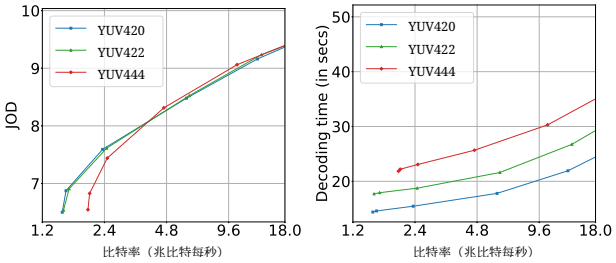


图 1：以超高清 UHD 分辨率，分别采用 YUV444、YUV422 和 YUV420 格式，通过 x265 编码的*CampfireParty* 序列 [18] 的码率–质量曲线和码率–时间曲线。“时间”表示解码时间，“质量”表示以刚可察觉差异（JOD）为单位的 ColorVideoVDP [19]。

然而，并非所有内容都表现出相同的色度复杂度。人类视觉系统（HVS）在大脑皮层中呈现出独特的色度处理，并在特定条件下表现出不同的色彩敏感度——例如在低亮度级别下（色度敏感度下降）或在高饱和度区域中（色度敏感度上升） [20], [21]。近期受人类视觉系统启发的感知色彩压缩方法利用这些效应来提高感知效率 [22]。图 1 展示了上海交通大学 4K 数据集 [18] 中一个代表性序列在 YUV444、YUV422 和 YUV420 格式下的总体码率–质量–复杂度表现。可以观察到，YUV444 视频所需的解码时间最高可达 YUV420 的两倍，而在最高 3.6 兆比特每秒的比特率下，YUV420 的质量高于 YUV444。这一观察表明，色度处理在总体解码成本中占相当大的比重，但在低色彩或去饱和场景中，其中很大一部分计算是冗余的。因此，色度自适应仍是一个尚未充分探索的机会，可在不牺牲感知质量的前提下降低能耗。

近期研究（例如 [23],）考察了位深度与色度子采样对编码效率及能耗的影响，范围涵盖SDR与高动态范围内容。尽管这些分析为8 位与10 位格式以及固定色度子采样格式（YUV444、YUV422、YUV420）之间的权衡提供了宝贵见解，但它们依赖于对每个标题的全部组合进行穷举式评估。这种静态方案并未纳入自适应性，并且仍与编码器控制逻辑或自适应流媒体框架相互隔离，即我们所称的编解码器侧决策流程；在该流程中，编码参数会在压缩期间根据内容统计信息和系统约束进行选择。通过整合色度自适应-

性纳入该流程，我们的方法能够直接影响编码决策，并可部署于实际流媒体系统中。

为弥补这一研究空白，我们提出核心假设：自适应色度子采样能够在不造成感知质量劣化的情况下，降低比特率和能耗。我们提出一种复杂度驱动框架，在每个目标比特率下动态选择空间分辨率或色度子采样格式，以最大化质量与复杂度的综合目标。通过避免在低复杂度区域进行冗余的色度处理，与基准方法相比，我们的方法显著降低了解码能耗。此外，该方法与编解码器无关，且兼容现有视频编码标准，例如 HEVC [24],VVC [25], 和 AV1 [26]。现代编解码器已包含与色度相关的工具，例如带色度缩放的亮度映射（LMCS） [27], 自适应颜色变换 [28], 交叉分量预测和基于深度学习的色度预测 [29],[30], 以及快速色度帧内模式决策技术 [31],，这些工具为集成自适应色度决策奠定了基础。

II. 自适应分辨率色度子采样（ARCS）框架

为在保持感知质量的同时实现高能效的视频传输，我们提出了一种自适应色度子采样框架，联合优化空间分辨率和色度子采样格式。所提出的方法不将色度子采样视为固定参数，而是根据内容特征和解码复杂度，针对每个比特率–分辨率组合动态确定最合适的色度表示形式。整体工作流程如图 2 所示。

A. 子采样视频的生成

该过程从原始高质量源视频开始，通常采用YUV444格式。对输入视频进行空间和色度子采样，以生成多个具有不同分辨率（例如，360p–2160p）和色度子采样格式（例如，YUV444、YUV422、YUV420）的候选表示形式。每种色度格式都代表了色彩保真度与采样密度之间的一种权衡。采用高质量重采样滤波器，以避免混叠，并保持所有版本之间的结构一致性。

B. 编码与解码评估

每种（r, c）配置均由其分辨率 r 和色度子采样格式 c定义，并使用状态为
先进的视频编码器编码，并用相应的视频解码器解码。对于每种配置，我们记录三个关键属性：

- 比特率：在给定量化参数或目标比特率下，从编码器获得的输出比特率。
- 感知质量：客观视觉质量指标，例如视频多方法评估融合（VMAF） [32],

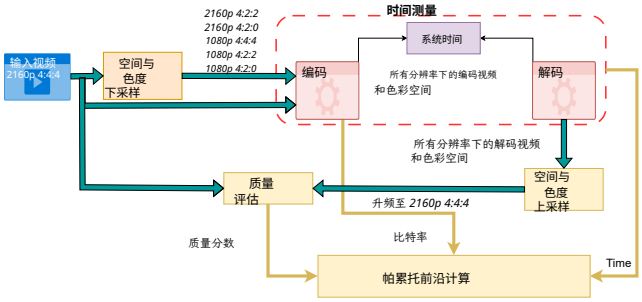


图 2：ARCS 方法概览。

峰值信噪比（PSNR） [33],或 Col- 或VideoVDP [19] ，是在解码和升频后，使用统一的参考域（例如，2160p YUV444）计算得出，以便进行公平比较。本文采用 ColorVideoVDP 作为指标，因为它是首个同时考虑视觉空间和时间方面的感知色彩指标 [19]。

- 复杂度：每帧的解码时间，用于表示计算负载，并作为解码能耗的替代指标 [3]。

这些测量构成了一个全面的数据集，描述了不同分辨率–色度组合之间的码率–质量–复杂度关系。

C. 质量–复杂度建模

为量化感知质量与计算成本之间的权衡，我们引入一个复合标量指标：

$$J = Q - \alpha \log(\tau_{\mathrm{D}}), \tag{1}$$

其中， Q表示感知质量得分， τ_{D} 表示每帧的平均解码时间， α 表示用于平衡质量与能效的可调系数 [34]。对数项确保解码时间适度增加时惩罚递减，从而实现更精细的权衡。

在优化之前， Q和 $\log(\tau_{\mathrm{D}})$ 均归一化到范围 $[0, 1]$:

$$J' = \frac{Q - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} - \alpha \frac{\log(\tau_{\mathrm{D}}) - \log(d_{\min})}{\log(d_{\max}) - \log(d_{\min})}. \tag{2}$$

这种归一化避免了对特定质量或复杂度尺度的偏向，并提高了跨内容类型和设备的通用性。

D. 自适应决策优化

对于目标比特率集合 ($\mathcal{B}$) 中的每个比特率 b，通过最大化复合目标函数，确定空间分辨率 r 与色度子采样格式 c 的最优组合：

$$(r^*, c^*)_\alpha = \underset{r \in \mathcal{R},\, c \in \mathcal{C}}{\arg\max}\, J'(r, c, b), \tag{3}$$

其中， $\mathcal{R}$和 $\mathcal{C}$ 分别表示可用分辨率和色度子采样格式的集合。该优化基于复合标量指标，选择在给定比特率下能提供最佳感知质量且解码开销最小的表示形式，

最终得到的最优（r^*, c^*）对序列涵盖所有码率目标，构成联合分辨率与色度子采样优化码率阶梯。

为确保适用于实际应用且符合感知一致性的自适应，引入了另外两个约束：

- 分辨率单调性：所选空间分辨率必须随着目标比特率的增加而非递减，即，$r_{i+1} \geq r_i$。这可以防止在较高比特率下出现不必要的降采样，并与自适应流媒体中传统的比特率阶梯行为保持一致。
- 随刷新变化的色度单调性：在固定分辨率区段内，色度保真度也受到约束，必须在更高比特率下保持非递减，即，$c_{i+1} \geq c_i$。但是，当分辨率提高（$r_{i+1} > r_i$）时，色度级别允许进行刷新——也就是说，它可以恢复为较低的子采样格式，然后在后续比特率下继续单调增加。

这些单调性规则共同形成了一条平滑且易于解释的比特率阶梯，避免了质量的突变，从而确保不同比特率级别之间的编码稳定性和感知一致性。

III. 评估设置

A. 数据集

为评估ARCS框架，我们使用来自上海交通大学数据集的15段超高清影片 [18], ，因为我们需要具有高色度保真度的源视频，具体为YUV444格式。此类素材使我们能够子采样到其他色度子采样格式（YUV422和YUV420），而不会引入可能使结果产生偏差的预处理伪影。

B. 指标

质量：我们计算加权YUV-PSNR [33], 和 ColorVideoVDP [19]。ColorVideoVDP以刚好可察觉差异（JOD）为单位报告视频质量。所有客观评分均在将解码输出映射到共同参考域（2160p YUV444）后，相对于原始YUV444参考进行计算，以确保不同分辨率和色度子采样格式之间的可比性。

解码复杂度：我们测量每帧平均解码时间（挂钟时间）并将其用作解码能耗的代理指标 [3]。

为进行汇总比较，我们报告Bjøntegaard增量码率 [35], $\mathrm{BDR_P}$、$\mathrm{BDR_C}$ （相对于峰值信噪比/CVVDP的BD码率），以及在相同工作点上使用对数码率的分段三次插值计算得到的Bjøntegaard增量解码时间（BDDT） [4] 。

C. 协议与实现细节

所有实验均在 2 颗 AMD EPYC ROME 7352 处理器（48 核）、512 GB 内存上运行，操作系统为 Alma Linux 9.4。如表 I 所示，对于每个序列和目标比特率 $b \in \mathcal{B}$，我们生成所有 (r, c) 组合，包括$r \in \{1080\mathrm{p}, 2160\mathrm{p}\}$ 以及 $c \in \{\mathrm{YUV420}, \mathrm{YUV422}, \mathrm{YUV444}\}$。在选择过程中，对 $\mathcal{B}$ 中每个目标比特率强制执行 $\pm 10\%$ 的严格容差窗口。对于每个目标比特率，ARCS

表 I：本文使用的实验参数。

参数		取值				
分辨率集合	$\mathcal{R}$	{ 1080, 2160 }				
比特率集合	$\mathcal{B}$	600 4500	900 5800	1600 8100	2400 11600	3400 16800
色彩空间集合	$\mathcal{C}$	{YUV420、YUV422、YUV444 }				
编码器		*x265 v4.1 [较慢]*				
解码器		*HM*				

选择使 $J' = Q' - \alpha d'$ 最大化的 (r^*, c^*)，其中 Q' 和 d'分别为逐标题归一化质量和 $\log(\tau_\mathrm{D})$（参见 式 2）。我们扫描 $\alpha \in [0, 1]$ 以揭示质量–能耗权衡。我们使用 *x265v4.1* （ slower 预设）进行编码，并使用 HM HEVC 参考解码器（单线程）进行解码。解码时间不包括 I/O，按帧取平均，每个工作点测量三次；我们报告均值。

D. 基准测试

ARCS与以下最先进的方法进行了比较：

1) *FixedLadder* [36]：我们采用苹果公司规定的 HLS 比特率阶梯，作为固定的比特率–分辨率组合集合。2) *Default*：对于给定的比特率集合，我们仅以原生 2160p 分辨率进行编码。该方法体现了其覆盖整个比特率阶梯范围的局限性，尤其是在低比特率下。3) *DynResJOD*：对 ARCS 色彩空间优化的消融研究。在该方法中，我们仅优化空间分辨率。

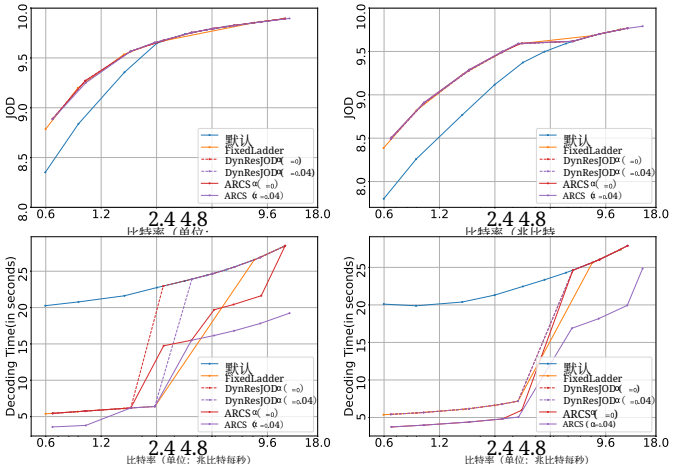
IV. 实验结果

A. 码率–质量–复杂度表现

图 3 展示了不同配置下 *Scarf* 和*Traffic Flow*序列的码率–质量（上）和码率–解码时间（下）特性。*Default* 配置在 2160p YUV444 下对所有表示形式进行编码，获得了最高的 ColorVideoVDP，但也带来了最大的解码成本。相比之下，*FixedLadder* 的复杂度有所降低，但由于采用固定的空间缩放，在低比特率下出现了明显的质量下降。*DynResJOD* 通过自适应调整空间分辨率改善了权衡关系，但其缺乏色度自适应，限制了其效率，导致质量提升趋于平台期。所提出的 ARCS框架实现了最优的码率–复杂度平衡。对于 $\alpha = 0$和 $\alpha = 0.04$，其感知质量几乎与 *Default* 配置相同，同时将解码时间最多降低了 50%。曲线在码率–解码时间域中呈现出一致的下移趋势，证实联合分辨率–色度自适应能够在不牺牲感知质量的情况下显著降低计算负载。

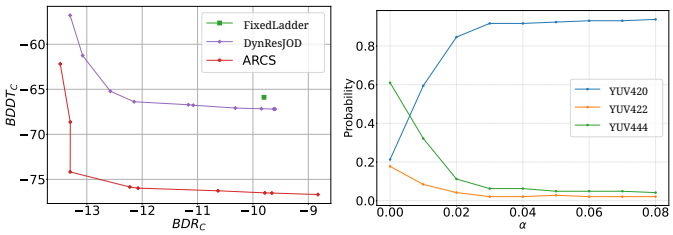
B. 正则化参数 α 的影响

正则化参数 α 控制感知保真度与解码能耗之间的平衡。如图 4(a) 所示，增大 α 会逐步使优化偏向能效，并沿着平滑的 BDR–BDDT前沿移动。当 α 取值较小时（$\alpha \leq 0.02$），ARCS 的表现如同



(a) Scarf (b) Traffic Flow

图3：两个代表性序列的码率-ColorVideoVDP曲线和码率-解码时间曲线。



(a) BDR 与 BDDT 的权衡关系 (b) 色彩空间的概率质量函数

图 4：不同 α 值下的结果。

传统的逐标题优化器：与默认相比，码率最多可节省 13 %，解码时间可缩短约 60–70%。当 α 增至 0.04–0.08 时，解码时间缩减超过 75%，而码率仅节省 8–12%，这一区间是最均衡的运行区域。

图 4(b) 中的概率质量函数（PMF）进一步展示了这一趋势：随着 α 上升，YUV420 的占比增加，而 YUV444 的使用减少，这表明在能耗约束下实现了受控的色度简化。这种渐进式转换验证了 α 是感知-能耗权衡关系中稳定且易于解释的控制因素。

C. 消融研究：色度自适应的影响

通过将*DynResJOD*与提出的 ARCS 框架进行比较，分析色度自适应的贡献。图 4(a) 展示了这两种方法在多个 α 值下的 BDR–BDDT 权衡。ARCS 的各项配置始终位于曲线上更有利的区域，这表明在感知质量相同的情况下，ARCS 能显著降低解码复杂度。这说明，整合色度自适应能够有效地将效率前沿推向能耗更低的方向。表 II 中的定量结果进一步印证了这一观察。在所有 α 值下，ARCS 在码率效率和解码时间缩减方面均优于 *DynResJOD* 。例如，在 $\alpha = 0.04$ 时，ARCS 的 $\mathrm{BDR_C}$ 达到 -12.07%，解码时间节省高达 75.97 %

表 II：ARCS 和基准测试相对于 默认 的平均性能。

方法 Name	α	$\mathrm{BDR_P}$ [%]	$\mathrm{BDR_C}$ [%]	$BDDT_P$ [%]	$BDDT_C$ [%]
FixedLadder	-	4.92	-9.80	-58.88	-65.89
DynResJOD	0	-7.21	-13.30	-49.05	-56.79
	0.01	-5.64	-13.07	-52.64	-61.26
	0.02	-4.81	-12.58	-56.60	-65.21
	0.04	-2.06	-11.17	-59.70	-66.71
	0.08	1.81	-9.62	-61.04	-67.19
ARCS	0	-8.94	-13.48	-53.84	-62.18
	0.01	-1.45	-13.30	-62.39	-68.63
	0.02	1.00	-13.30	-66.77	-74.17
	0.04	4.15	-12.07	-69.21	-75.97
	0.08	12.94	-8.83	-70.54	-76.68

（$BDDT_C$），比*DynResJOD*高出约 10%。这些结果证实，色度自适应是 ARCS 实现显著码率–能耗权衡的关键因素。

D. 总体性能与讨论

在各项基准测试中，ARCS 实现了最优的码率–能耗权衡。相较于默认，ARCS 同时提升了编码效率并降低了复杂度：在 $\alpha=0$ 时，其 BDR 达到$-13.48\%_{\mathrm{C}}$，同时解码时间缩减 -62.18%（$BDDT_C$）（表II）。提高 α 会使方案进一步偏向更高效率：在 $\alpha = 0.04$ 时，ARCS 在感知质量接近基线的情况下（$\mathrm{BDR_C}=-12.07\,\%$），将解码时间缩短了 -75.97%；在 $\alpha = 0.08$ 时，解码时间节省达到 -76.68%。结果表明，将色度作为一等自适应轴，可在负 BD码率代价下显著缩短解码时间，并将传统自适应码率设计扩展至色彩域，从而实现节能流媒体传输。

V. 结论

我们提出了自适应分辨率–色度子采样（ARCS），这是一个将色度保真度与空间分辨率并列为一等自适应轴的节能视频编码框架。通过在单调性约束下最大化综合质量–复杂度目标，ARCS 构建了兼具感知一致性与计算效率的码率阶梯。在 SJTU UHD 数据集上，相较于默认设置，ARCS 在 α 上同时实现了编码与复杂度增益：在 $\alpha=0$ 时，$\mathrm{BDR}-13.48\,\%$达到$_{\mathrm{C}}$，并将解码时间缩减 -62.18%（$BDDT_C$）；在 $\alpha=0.04$时，其保持接近基线的感知质量（$\mathrm{BDR_C}=-12.07\%$），同时将解码时间缩减-75.97%；即使在 $\alpha=0.08$时，解码时间节省仍然很高（$-76.68\,\%$），且 $\mathrm{BDR_C}$为 -8.83%。BDR–BDDT前沿表明，增大 α 会平滑地将选择转向 YUV420（若有利），证实了 ARCS 对质量–能耗权衡具有稳定且可解释的控制能力。在实践中，ARCS 可自然地集成到逐标题或逐片段工作流中，并且与编解码器无关（HEVC、VVC、AV1）。未来工作包括主观验证、硬件解码器能耗分析、结合实时自适应码率控制的端到端 HAS 集成，以及在设备与内容约束下对分辨率–色度选择进行基于学习的预测。

参考文献

[1] 思科，《思科视觉网络指数：2017–2022 年预测与方法论（白皮书）》，2019 年。[2] T. Chachou、W. Hamidouche、S. A. Fezza 和 G. Belalem，《现代软件视频编码器的能耗与碳排放》，*IEEE* 消费电子杂志，第 1–16 页，2023 年。[3] C. Herglotz、E. Walencik 和 A. Kaup，《使用解码器处理时间估算 HEVC 解码能耗》，载于*2015 IEEE* 电路与系统国际研讨会（*ISCAS*），2015 年，第 513–516 页。[4] C. Herglotz 和 A. Kaup，《HEVC 硬件解码器的解码能耗估算》，载于*2018 IEEE* 电路与系统国际研讨会（*ISCAS*），2018 年，第 1–5 页。[5] C. Herglotz、S. L. Moan 和 A. Mercat，《HDR 视频编码中的能耗降低机会》，载于*2024 IEEE* 图像处理国际会议（*ICIP*），2024 年，第 3654–3660 页。[6] A. Mercat、J. Sainio、S. Le Moan 和 C. Herglotz，《我们需要 10比特吗？面向节能 HDR 视频流媒体的 HEVC 编码器评估》，*IEEE* 电路与系统新兴和精选主题期刊，第 15 卷，第 1 期，第 31–43 页，2025年。[7] A. V. Katsenou、J. Sole 和 D. R. Bull，《面向自适应视频流媒体的内容无关码率阶梯预测》，载于*2019* 图像编码研讨会（*PCS*），2019 年。[8] Jan De Cock、Zhi Li、Megha Manohara 和 Anne Aaron，《云端基于复杂度的一致质量编码》，载于*2016 IEEE* 图像处理国际会议（*ICIP*），2016 年，第 1484–1488 页。[9] V. V. Menon、P. T. Rajendran、C. Feldmann、K. Schoeffmann、M. Ghanbari 和 C. Timmerer，《感知 JND 的两遍逐标题编码方案：用于自适应直播》，*IEEE* 视频技术电路与系统汇刊，第 1–1 页，2023 年。[10] V. V. Menon、A. Premkumar、P. T. Rajendran、A. Wieckowski、B. Bross、C. Timmerer 和 D. Marpe，《具有延迟感知动态分辨率编码的节能自适应视频流媒体》，载于第 *3* 届 *Mile-High*视频会议论文集，2024 年，第 21–27 页。[11] V. V. Menon、S. Afzal、P. T. Rajendran、K. Schoeffmann、R. Prodan 和 C. Timmerer，《用于绿色直播的内容自适应可变帧率编码方案》，2023 年。[12] P. T. Rajendran、S. Afzal、V. V. Menon 和 C. Timmerer，《面向自适应视频流媒体的能耗–质量感知可变帧率帕累托前沿》，载于*2024 IEEE* 视觉通信与图像处理国际会议（*VCIP*），2024 年 12 月，第 1–5 页，ISSN：2642-9357。[13] V. V. Menon、H. Amirpour、M. Ghanbari 和 C. Timmerer，《EMES：面向基于 HEVC 的自适应码率流媒体的高效多重编码方案》，*ACM* 多媒体计算、通信与应用汇刊，第 19 卷，第 3s 期，2023 年 3 月。[14] Q. Fu、C. Jung、G. Yang 和 Y. Liu，《用于 HDR/宽色域视频编码的加权色度下采样与亮度参考色度上采样》，*IEEE Access*，第 7 卷，第 55 237–55 247 页，2019 年。[15] R. Boitard、M. T. Pourazad 和 P. Nasiopoulos，《高动态范围视频压缩中色度子采样的评估》，载于*2016 IEEE* 电子、电路与系统国际会议（*ICECS*），2016 年，第 696–699 页。[16] H. Thoma、M. de Frutos-L´opez 和 J. Auer，《具有改进主观质量的 HDR 视频色度子采样》，载于*2013* 图像编码研讨会（*PCS*），2013 年，第 345–348 页。[17] L. Karam 和 C. Podilchuk，《超低比特率视频的色度编码》，载于国际图像处理会议论文集，第 1 卷，1995 年，第 562–565 页，第 1 卷。[18] Li Song、Xun Tang、Wei Zhang、Xiaokang Yang 和 Pingjian Xia，《SJTU 4K视频序列数据集》，载于*2013* 第五届多媒体体验质量国际研讨会（*QoMEX*），2013 年 7 月，第 34–35 页。

[19] R. K. Mantiuk, P. Hanji, M. Ashraf, Y. Asano, and A. Chapiro，《ColorVideoVDP：一种用于图像、视频和显示失真的视觉差异预测器》，*ACM* 图形学汇刊，第 43 卷，第 4 期，第 1–20 页，2024年7月。[20] K. R. Gegenfurtner，《色觉的皮层机制》，《自然·神经科学评论》，第 563–572 页，2003年。[21] A. Chaparro, C. F. Stromeyer, E. P. Huang, R. E. Kronauer, and R. T. Eskew，《色彩是眼睛最擅长感知的事物》，《自然》，第 348–350 页，1993年。[22] L. Prangnell and V. Sanchez，《基于人类视觉系统的图像数据感知颜色压缩》，发表于*ICASSP 2021 - 2021 IEEE* 声学、语音与信号处理国际会议（*ICASSP*），2021年，第 1600–1604 页。[23] H. Amirpour, L. Qu, J. H. Ko, C. Stejerean, and C. Timmerer，《节能视频流媒体：位深度与色度子采样研究》，发表于*2024 IEEE* 视觉通信与图像处理国际会议（*VCIP*），2024年，第 1–5 页。[24] G. J. Sullivan, J. R. Ohm, W. J. Han, and T. Wiegand，《高效视频编码（HEVC）标准概述》，*IEEE* 视频技术电路与系统汇刊，第 22 卷，第 12 期，第 1649–1668 页，2012年。[25] B. Bross, Y.-K. Wang, Y. Ye, S. Liu, J. Chen, G. J. Sullivan, and J.-R. Ohm，《多功能视频编码（VVC）标准及其应用概述》，*IEEE* 视频技术电路与系统汇刊，第 1–1 页，2021年。[26] J. Han, B. Li, D. Mukherjee, C.-H. Chiang, A. Grange, C. Chen, H. Su, S. Parker, S. Deng, U. Joshi, Y. Chen, Y. Wang, P. Wilkins, Y. Xu, and J. Bankoski，《AV1 技术概述》，第 109 卷，第 9 期，第 1435–1462 页，2021年9月。[27] T. Lu, F. Pu, P. Yin, S. McCarthy, W. Husak, T. Chen, E. Francois, C. Chevance, F. Hiron, J. Chen, R.-L. Liao, Y. Ye, and J. Luo，《多功能视频编码中的亮度映射与色度缩放》，发表于*2020*年数据压缩会议（*DCC*），2020年，第 193–202 页。[28] H.-J. Jhu, X. Xiu, Y.-W. Chen, T.-C. Ma, and X. Wang，《VVC 标准中的自适应颜色变换》，发表于*2020*年 *IEEE* 视觉通信与图像处理国际会议（*VCIP*），2020年，第 314–317 页。[29] P. Astola, A. Aminlou, R. G. Youvalari, and J. Lainema，《用于视频编码色度预测的卷积跨分量模型》，*IEEE* 视频技术电路与系统汇刊，第 35 卷，第 3 期，第 2854–2869 页，2025年。[30] L. Zhu, Y. Zhang, S. Wang, S. Kwong, X. Jin, and Y. Qiao，《用于多功能视频编码帧内编码的基于深度学习的色度预测》，*IEEE* 视频技术电路与系统汇刊，第 31 卷，第 8 期，第 3168–3181 页，2021年。[31] H. Wang, F. Yuan, L. Zhang, J. Chen, F. L. Wang, and Z. Pan，《用于 VVC 色度帧内编码的基于空间相似性的快速模式决策》，发表于*2024*年 *IEEE* 视觉通信与图像处理国际会议（*VCIP*），2024年，第 1–5 页。[32] Netflix 技术博客，《VMAF：旅程仍在继续》，2018年10月。 [在线]。可访问：https://netflixtechblog.com/ vmaf-the-journey-continues-

44 51 9 12 b ee ed I.-T.

[33] HSTP-VID-WPOM 和 I. T. 23002-8，《视频编码效率实验评估中使用客观指标的工作实践》，2021年。 [在线]。可访问：https://www.itu.int/pub/T-TUT-ASC-2020-HSTP1[34] A. Katsenou, V. V. Menon, G. Laurinaviciute, B. Bross, and D. Marpe，《面向高效自适应 VVC 流传输的多目标帕累托前沿优化》，

2026 [ ] 2601 10607 。在

[35] 线。可访问：https://arxiv.org/abs/。G. Bjontegaard，《计算 RD 曲线之间的平均峰值信噪比差异》，*VCEG-M33*，2001年。[36] 苹果公司，《Apple 设备 HLS 创作规范》。[在线]。可访问：https://developer.apple.com/documentation/http live streaming/hls authoring specification for apple devices

_ _ _ _ _ _ _