

- Cinema Pro HDR v0.2 发明技术披露书
 - 目录
 - 1. 技术领域与背景
 - 2. 发明目的与技术问题
 - 3. 符号约定与工作域
 - 4. 核心技术方案
 - 4.1 CPH-PPR（默认曲线）
 - 4.2 CPH-RLOG（备选曲线）
 - 4.3 软膝与黑位 toe（防炸峰/发灰）
 - 4.4 OKLab 分层饱和与两级色域回扣
 - 4.5 回退状态机（兼容/安全执行）
 - 5. 元数据与封装（基础层 + 扩展层）
 - 6. 实施例与工程实现要点
 - 7. 技术效果与可验证指标（有益效果）
 - 8. 与现有技术对比（新颖性/创造性要点）
 - 9. 权利要求书草案要点
 - 10. 附图清单与出图说明
 - 11. 名词表与默认参数
 - 12. 文档与交付物命名建议
 - 附：侧车 JSON Schema 片段

Cinema Pro HDR v0.2 发明技术披露书

目录

- 1. 技术领域与背景
- 2. 发明目的与技术问题
- 3. 符号约定与工作域
- 4. 核心技术方案
 - 4.1 CPH-PPR（默认曲线）
 - 4.2 CPH-RLOG（备选曲线）
 - 4.3 软膝与黑位 toe（防炸峰/发灰）
 - 4.4 OKLab 分层饱和与两级色域回扣
 - 4.5 回退状态机（兼容/安全执行）

- 5. 元数据与封装（基础层 + 扩展层）
- 6. 实施例与工程实现要点
- 7. 技术效果与可验证指标（有益效果）
- 8. 与现有技术对比（新颖性/创造性要点）
- 9. 权利要求书草案要点（供代理取材）
- 10. 附图清单与出图说明
- 11. 名词表与默认参数
- 12. 文档与交付物命名建议

1. 技术领域与背景

本发明涉及电影级 HDR（高动态范围）色调映射与色彩管理，尤其是一种兼容 ST 2094-10 基础层、并通过原创解析曲线（PPR/RLOG）+ 分层细节/饱和实现创作意图可控与放映端可适配的动态映射方法、装置、存储介质及其元数据封装。

痛点：

- 既有生态（Dolby Vision/HDR10+/HDR Vivid）在影院/放映端的可用性、兼容性与授权复杂度不一；
- 传统 Sigmoid/Bezier/样条式映射在参数可解释性、单调性/C¹ 保障、闪烁抑制方面存在工程隐患；
- 导演意图跨终端复现缺乏参数化/可审计的基线与扩展机制。

2. 发明目的与技术问题

目的：在不破坏现有生态的前提下，提供一种基础层完全兼容 ST 2094-10、扩展层采用原创曲线族（PPR/RLOG）并具有分层细节增强与感知饱和控制的动态映射方案；在设备不支持/风险检测时自动回退，在支持时实现创作意图的参数化还原与设备适配。

解决的问题：

- 曲线可解释与创作参数 → 数学参数的一一对应；

2. 单调 + C^1 可证明与可检测，降低条带/闪烁；
3. 高光细节与OKLab 分层饱和的稳定增强；
4. 双层元数据（2094-10 基础 + CPH 扩展）与回退状态机，避免二次映射；
5. DCI 合规与色域越界的工程化检查与报告能力。

3. 符号约定与工作域

- 输入亮度标量： $x \in [0, 1]$ （PQ 归一域；ST 2084 归一后 0=黑，1=峰值）。
- 输出亮度标量： $y \in [0, 1]$ （同域）。
- 中灰枢轴： $p \in (0, 1)$ ，建议默认 $p \approx \text{PQ}(0.18)$ 。
- 典型参数域：
 - $\gamma_s \in [1.0, 1.6]$ （暗部幂指数）
 - $\gamma_h \in [0.8, 1.4]$ （高光幂指数）
 - $h \in [0.5, 3.0]$ （高光肩部压缩）
 - $k = 1.0$ （增益，常数）
- C^1 平滑窗（用于段间混合）：

$$\text{smoothstep}(a, b, x) = t^2(3 - 2t), \quad t = \text{clamp}\left(\frac{x - a}{b - a}, 0, 1\right)$$

4. 核心技术方案

4.1 CPH-PPR（默认曲线）

思想：以中灰枢轴为支点，暗部用幂型控制对比，高光用有理式自然收肩，采用 C^1 平滑窗在枢轴邻域混合，整体单调且 C^1 连续。

分段与混合：

- 暗部幂段（ $x \leq p$ ）：

$$y_s(x) = p \cdot \left(\frac{x}{p}\right)^{\gamma_s}$$

- 高光有理段 ($x \geq p$):

$$y_h(x) = \left(\frac{kx}{1 + hx} \right)^{\gamma_h}$$

- 过渡权重 (中心 p , 半宽 $\Delta \approx 0.1$):

$$w(x) = \text{smoothstep}(p - \Delta, p + \Delta, x)$$

- 全域输出:

$$y(x) = (1 - w)y_s + wy_h$$

单调性 (充分条件):

- 暗部导数:

$$\frac{dy_s}{dx} = \gamma_s p^{1-\gamma_s} x^{\gamma_s-1} \geq 0 \Rightarrow \gamma_s \geq 0$$

- 高光导数:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{kx}{1 + hx} \right) = \frac{k}{(1 + hx)^2} > 0$$

进而 $y_h(\cdot)^{\gamma_h}$ 保单调 ($\gamma_h > 0$)。

- 因 $0 \leq w \leq 1$ 且 w 单调增, 左右段各自单调时, 混合亦单调 (工程上以**4096** 采样验证)。

C¹ 连续性 (实操验证准则): 在 $p \pm \epsilon$ 进行左右差分导数估计, 阈值 $< 10^{-3}$ 判定通过。

4.2 CPH-RLOG (备选曲线)

思想: 暗部采用**对数**以提升低亮度控制, 高光采用**有理式**稳态压肩, 在阈值 t 邻域以 C¹ 平滑窗拼接。

- 暗部对数段:

$$y_s(x) = \frac{\ln(1 + ax)}{\ln(1 + a)}, \quad a > 0$$

- 高光有理段:

$$y_h(x) = \frac{bx}{1 + cx}, \quad b > 0, c > 0$$

- 阈值拼接（宽度 $\delta \approx 0.05$ ）：

$$w(x) = \text{smoothstep}(t - \delta, t + \delta, x), \quad y = (1 - w)y_s + wy_h$$

单调性：

$$\frac{dy_s}{dx} = \frac{a}{(1 + a) \ln(1 + a)} \cdot \frac{1}{1 + ax} > 0, \quad \frac{dy_h}{dx} = \frac{b}{(1 + cx)^2} > 0$$

4.3 软膝与黑位 toe（防炸峰/发灰）

- 软膝（Soft-Knee）：

$$y_{\text{knee}} = y - \alpha \cdot \text{smoothstep}(y_k, 1, y) \cdot (y - y_k), \quad y_k \in [0.95, 0.99], \alpha \in [0.2, 1.0]$$

- 黑位 toe：

$$y_{\text{toe}} = \max(0, y_{\text{knee}} - t_0), \quad t_0 \in [0, 0.01]$$

两者均为 C^1 可微且保持单调。

4.4 OKLab 分层饱和与两级色域回扣

流程：线性 RGB \rightarrow XYZ（标准矩阵） \rightarrow OKLab。

- 全局饱和： $(a, b) \leftarrow s_{\text{base}} \cdot (a, b)$, $s_{\text{base}} \in [0, 2]$
- 亮区饱和： $(a, b) \leftarrow s_{\text{hi}}(x) \cdot (a, b)$ ，其中

$$s_{\text{hi}}(x) = 1 + (s_{\text{hi}} - 1) \cdot \text{smoothstep}(p, 1, x)$$

回到 RGB 后执行两级色域回扣：

1. 一级线性压制（ 3×3 映射至目标原色三角形）：

$$\text{RGB}_{\text{clamp}} = \text{clip}(\mathbf{M}_{\text{src} \rightarrow \text{dst}} \cdot \text{RGB}, 0, 1)$$

2. 二级感知夹持（OKLab 半径缩放）：

- 令 $(L, a, b) = \text{OKLab}(\text{RGB}_{\text{clamp}})$ ，色度半径 $C = \sqrt{a^2 + b^2}$
- 若超出上界 $C_{\text{max}}(L)$ ，缩放：

$$s = \min\left(1, \frac{C_{\text{max}}(L)}{C + \epsilon}\right), \quad (a, b) \leftarrow s \cdot (a, b)$$

- 逆变换至 RGB。记录越界占比与 **worst-10** 样本坐标。

4.5 回退状态机（兼容/安全执行）

核心原则：检测到他家动态映射或任何不确定风险 → 禁用扩展/回退，绝不二次映射。

```
if Detect(DV | HDR10+ | Vivid active) -> DISABLE(CPH_exec)           // 禁止叠加
else if !Support(CPH_ext) or SidecarMissing or SchemaError -> USE(ST2094-
10_baseline)
else if !Monotonic || !C1 || Flicker>th || Perf>budget || DCI_fail ->
DEGRADE_or_FALLBACK()
else -> ENABLE(CPH_exec_with_LED_adaptation)
```

- **ENABLE**时允许**LED 自适应**（按峰值/黑位微调 shoulder/black_lift/sat_hi），仍保证单调 +C¹。
- **FALLBACK**路径：仅基础层（2094-10）或 **y=x** 硬回退（异常时）。

5. 元数据与封装（基础层 + 扩展层）

基础层：**ST 2094-10** 常用统计与显示目标参数（可被现有生态读取）。扩展层：**CPH 参数块**（版本、曲线类型与参数、工作域、时间码/GUID 等）。

侧车 **JSON** 示例（可等效封装至 **SEI** 或 **ISOBMFF** 私有 **box**）：

```
{
  "$schema": "https://json-schema.org/draft/2020-12/schema",
  "st2094_10": {
    "minPqEncodedMaxRGB": 12,
    "avgPqEncodedMaxRGB": 280,
    "maxPqEncodedMaxRGB": 900
  },
  "cph_meta": {
    "cph_version": 2,
    "cph_curve_id": 0,           // 0=PPR, 1=RLOG
    "pivot": 0.18,
    "gamma_s": 1.25,
    "gamma_h": 1.10,
    "shoulder": 1.5,
    "black_lift": 0.005,
    "highlight_detail": 0.6,
    "sat_base": 1.0,
    "sat_hi": 0.95,
    "work_cs": "BT2020_PQ",
    "hash_clip_guid": "uuid-v4",
```

```
"timecode_inout": "01:00:00:00-01:00:12:12"
}
```

版本与回退: `cph_version` 不被识别或字段越界 → 记录错误码并回退基础层。

6. 实施例与工程实现要点

- **GPU 实现**: 逐像素 $O(1)$, 用权重混合替代分支; FP16 计算 + FP32 累加; 确定性模式下禁用 FMA 合并 (编译开关记录)。
- **导数开销** (便于优化):

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{kx}{1+hx} \right)^{y_h} = y_h \left(\frac{kx}{1+hx} \right)^{y_h-1} \cdot \frac{k}{(1+hx)^2}$$

- **统计与频域分析**: 实时计算 min/avg/max $P_q\text{MaxRGB}$; 闪烁检测 (1-6Hz) 可异步执行或离线验证。
- **DCI 合规模式**: P3-D65 限域, 白点 ≈ 300 nits、黑位 ≈ 0.005 nits、EOTF=PQ 信令检查; 超界自动保守化或回退。

7. 技术效果与可验证指标 (有益效果)

以下指标作为验收口径与可审计证据 (SLA)。

1. 单调 & C1 连续性

- 4096 均匀采样 + 枢轴邻域 256 重点点; 左右差分导数阈值 $< 1e-3$ 。

2. 亮度/EOTF 跟踪

- PQ 归一域 0.01 → 0.98: **RMS $\leq 5\%$** 、最大 $\leq 10\%$;
- 软膝后过曝像素占比 $\leq 0.5\%$ 。

3. 色差 (LUT 近似)

- **P3-D65**: ΔE_{00} 均值 ≤ 0.5 ; **P99 ≤ 1.0** ; 最大 ≤ 2.0 (输出 **worst-10** 样本)。

4. 抗闪烁 (时间稳定)

- 帧差 RMS: 不高于参考流程 110%;

- 1-6 Hz 频段能量开启细节后不得上升 > 20%。

5. 性能

- 4K24 < 1.0 ms/帧、8K24 < 3.5 ms/帧；统计方法：预热 100 帧，计 3000 帧，取中位/P95。

6. 色域与合规

- 越界占比 $\leq 0.2\%$ ；列举 worst-10；
- DCI 模式：白点/黑位与 EOTF 信令通过；失败非 0 退出码并输出定位报告。

8. 与现有技术对比（新颖性/创造性要点）

1. 曲线构型差异

- 本发明采用幂 + 有理/对数 + C¹ 平滑窗的解析组合（PPR/RLOG），区别于 Sigmoid（ST 2094-10）、Bezier（HDR10+）、分段样条（Vivid）。

2. C¹ 与单调可证性

- 提供导数解析式与工程级验证准则（4096 采样 + 枢轴邻域差分），降低条带/闪烁风险，优于统计生成式曲线的不确定性。

3. 分层饱和 + 两级回扣

- 在 OKLab 实施亮区独立饱和控制与半径夹持，结合 3×3 线性压制，兼顾“电影味道”与影院色容积边界。

4. 双层元数据 + 回退状态机

- 基础层完全兼容 2094-10；扩展层参数化且遇到 DV/HDR10+/Vivid 或异常自动回退，避免二次色调映射，工程可用性强。

5. DCI 合规工具化

- 将白点/黑位/EOTF/色域边界检查工具化与报告化，增强可审查/可追溯能力。

9. 权利要求书草案要点

独立权 1（方法） 一种电影 HDR 动态映射方法，包括：

- 在 PQ 归一域对输入亮度 x 进行映射；
- 基于**枢轴幂段**与**高光有理段**构造目标曲线，并在枢轴邻域以 C^1 平滑窗混合得到输出 y ，所述输出满足单调与 C^1 连续；
- 在输出端对 y 施加**软膝**与**黑位 toe**；
- 在 **OKLab** 域执行**分层饱和度调制**并实施**两级色域回扣**；
- 通过**双层元数据**（ST 2094-10 基础层与扩展层参数）进行传输与回退控制，其中回退状态机在检测到外部动态映射激活、参数越界、单调/ C^1 失败、闪烁/性能/合规失败时禁用扩展或回退。

独立权 2（装置/系统）（包含处理器、存储器与接口；内置回退状态机与参数适配模块）

独立权 3（存储介质）（存储可执行程序，执行权 1 所述方法步骤）

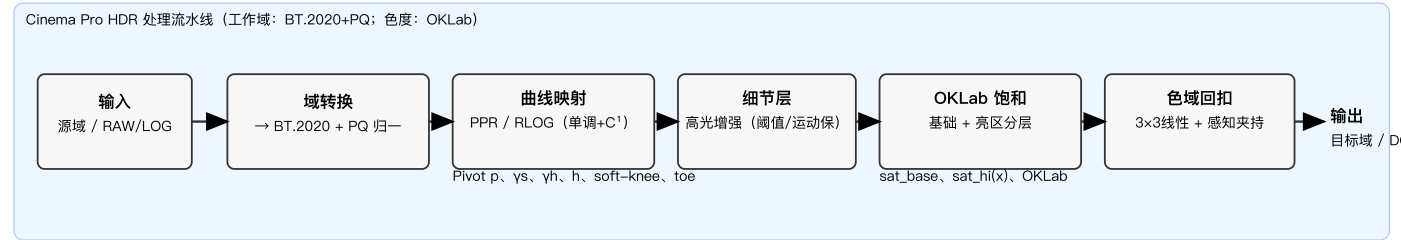
从属权要点（可选）

- PPR/RLOG 具体数学式与参数域；
- 平滑窗采用 **smoothstep**；
- DCI 合规模式（P3-D65 限域 + 软膝/toe 策略）；
- 侧车 JSON 字段/版本与 SEI/私有 box 等等效承载；
- 详细回退条件集合与优先级。

10. 附图清单与出图说明

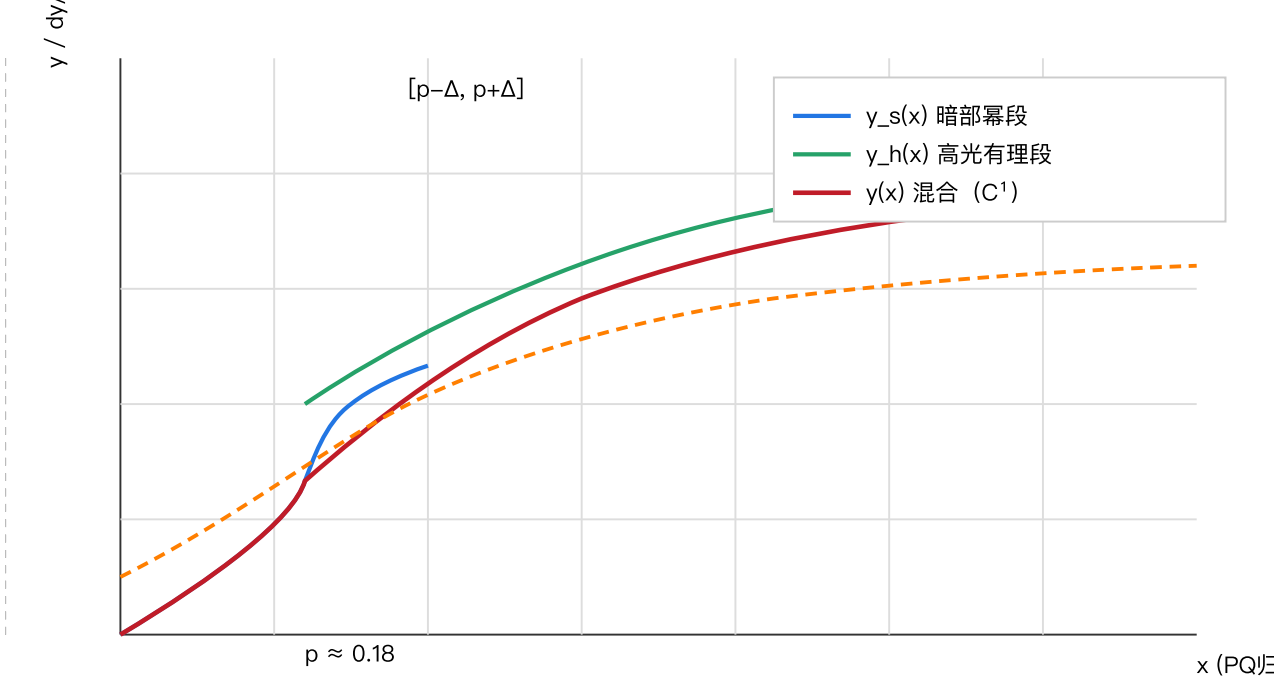
建议统一坐标 0-1，标注默认参数与关键点 (p 、 Δ 、 t 、 δ 、 y_k 、 α 、 t_0)。流程图用菱形判定节点与回退终端。

1. **fig01_system_pipeline.svg** —— 系统框图：输入 \rightarrow BT.2020+PQ \rightarrow 曲线 (PPR/RLOG) \rightarrow 细节层 \rightarrow OKLab 饱和 \rightarrow 色域回扣 \rightarrow 输出。



2. **fig02_ppr_curve_and_derivative.svg** —— PPR 的 (y_s , y_h , y) 与 $\frac{dy}{dx}$ ；标注 (p , Δ)。

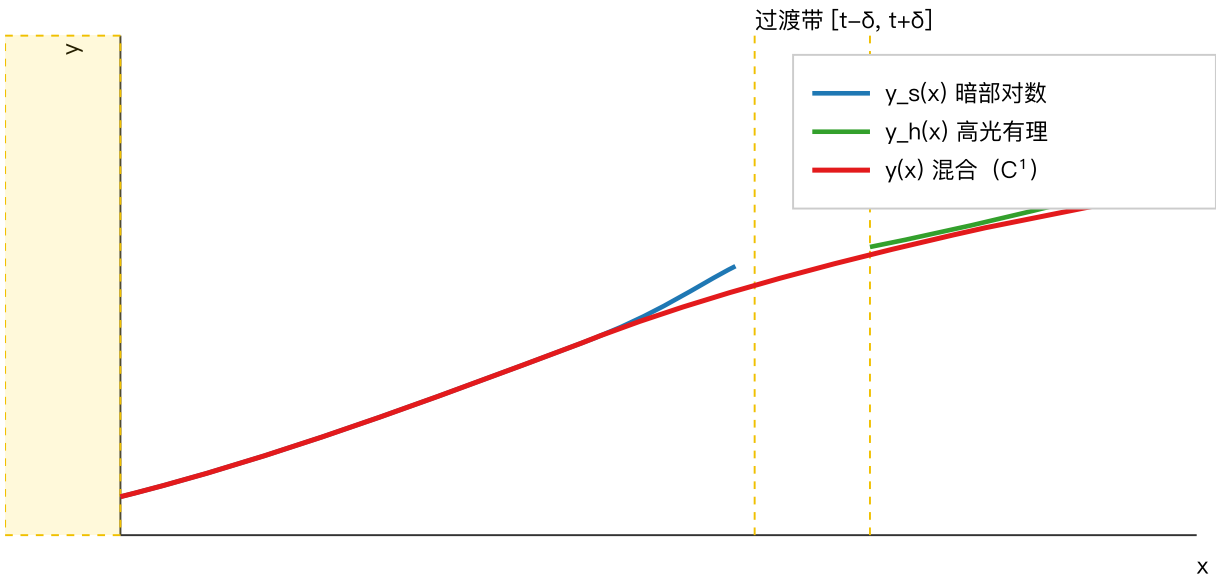
PR 曲线与导数示意（示例参数： $p=0.18$, $\gamma_s=1.2$, $\gamma_h=1.1$, $h=1.5$, $\Delta=0.1$ ）



3.

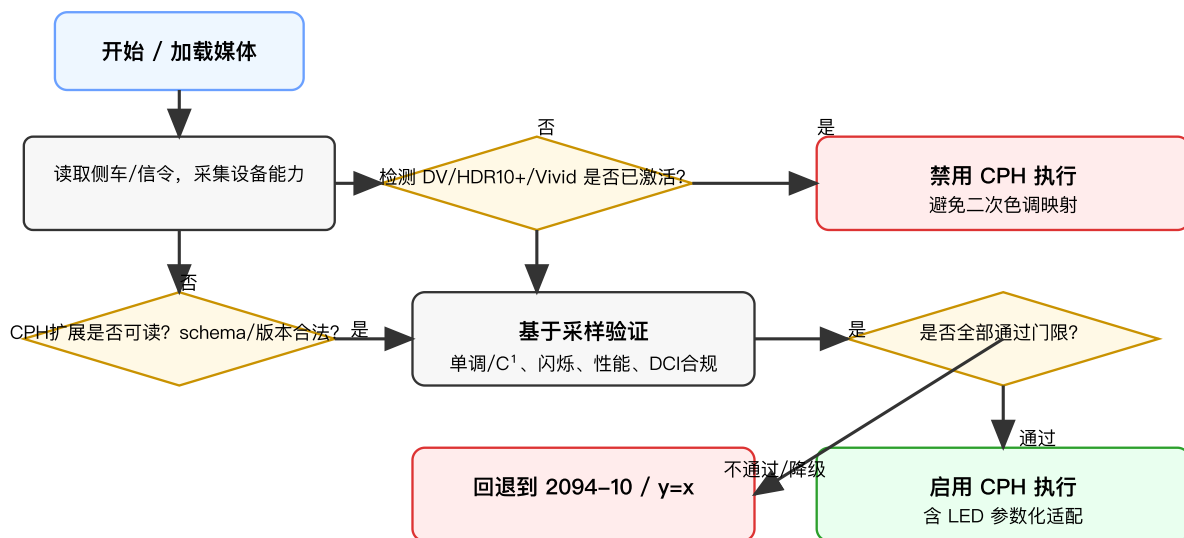
fig03_rlog_blend.svg — RLOG 在 $t \pm \delta$ 的权重曲线与两段曲线拼接示意。

RLOG 拼接示意 ($t \pm \delta$ 过渡带； $a=6$, $b=1.0$, $c=1.2$, $t=0.55$, $\delta=0.05$)



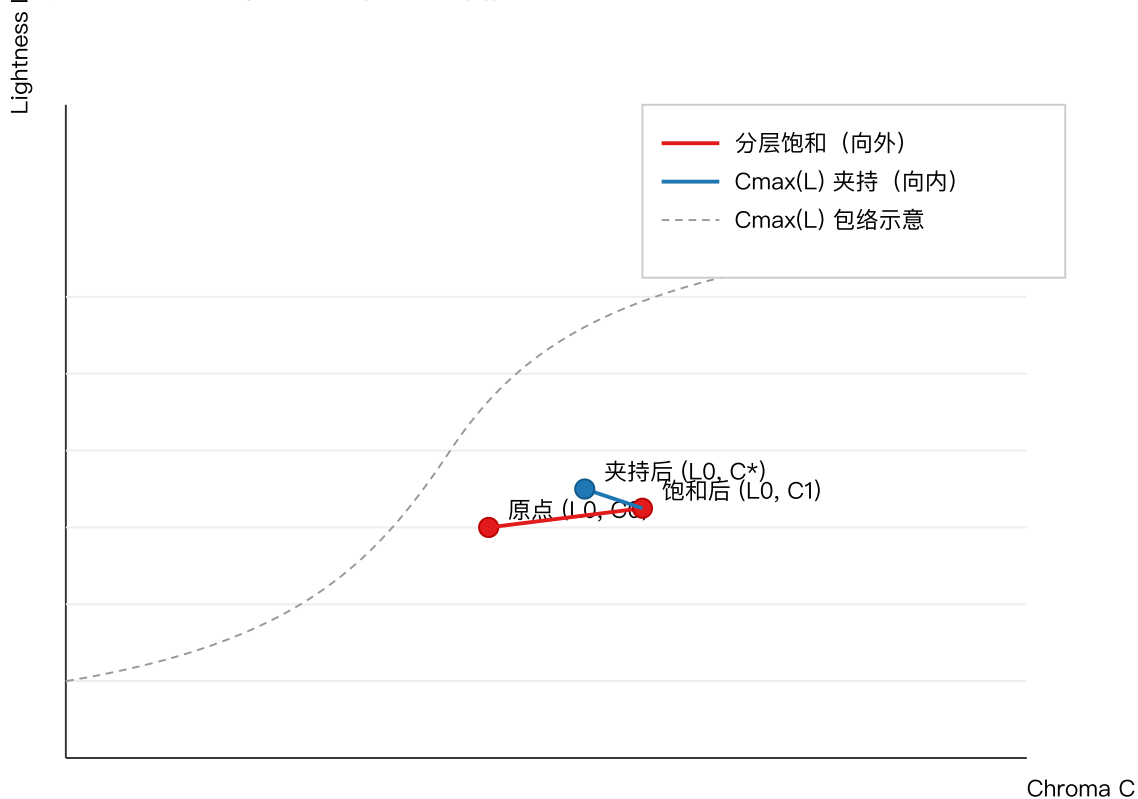
4.

fig04_fallback_state_machine.svg — 回退/启用判定流程：检测 DV/HDR10+/Vivid、schema、单调/ C^1 、闪烁/性能/合规门。



5. **fig05_oklab_saturation_and_gamut_clamp.svg** —— OKLab 分层饱和与半径夹持 (C-L 平面) 示意。

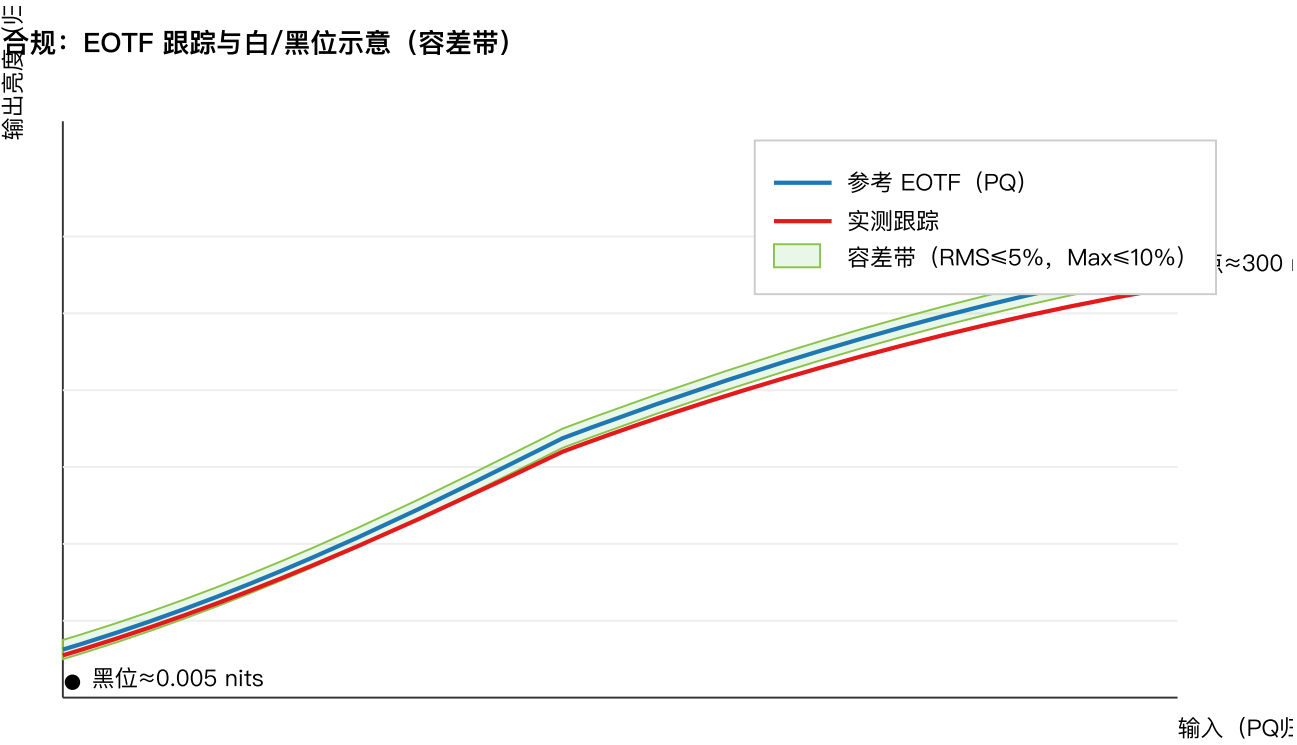
OKLab 分层饱和与色域半径夹持 (C-L 平面)



6.

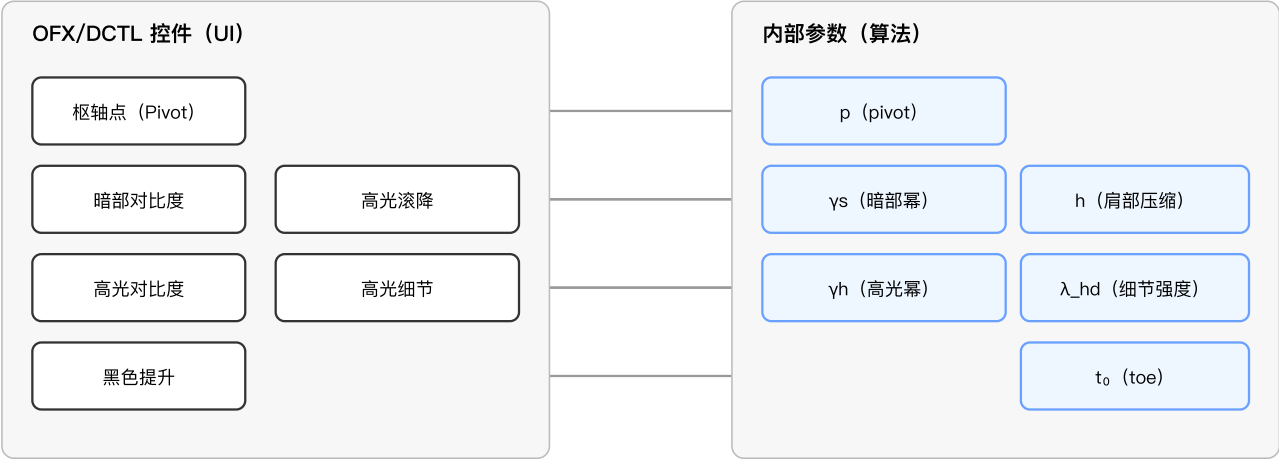
fig06_dci_compliance_tracking.svg —— DCI 模式白点/黑位与 EOTF 跟踪容差带示意。

图 11-1: DCI-P3 规格: EOTF 跟踪与白/黑位示意 (容差带)



7. fig07_ui_knob_mapping.svg —— “五旋钮 → 参数”映射关系图: Pivot、Shadows/Highlight、Roll-off、Detail、Black Lift → $(p, \gamma_s, \gamma_h, h, \lambda_{hd}, t_0)$ 。

UI 五旋钮 → 内部参数映射



映射示例: $\gamma_s = 1.0 + 0.6 \cdot S$; $\gamma_h = 0.8 + 0.6 \cdot H$; $h = 0.5 + 2.5 \cdot R$; $\lambda_{hd} \in [0,1]$

11. 名词表与默认参数

- **PPR**: Pivoted Power-Rational; **RLOG**: Rational-Logarithmic
- **Pivot (p)**: 默认 $\approx PQ(0.18)$
- **参数推荐域**:

- $\gamma_s \in [1.0, 1.6]$, $\gamma_h \in [0.8, 1.4]$, $h \in [0.5, 3.0]$
- 软膝: $\gamma_k \in [0.95, 0.99]$, $\alpha \in [0.2, 1.0]$
- toe: $t_0 \in [0, 0.01]$
- RLOG: $a \in [1, 16]$, $b \in [0.8, 1.2]$, $c \in [0.5, 3.0]$, $t \in [0.4, 0.7]$, $\delta \approx 0.05$

12. 文档与交付物命名建议

- 披露书主文档: `Cinema_Pro_HDR_发明技术披露书.md`
 - 附图目录: `fig01_system_pipeline.svg ... fig07_ui_knob_mapping.svg`
 - 数学附录 (可转 PDF 提交): `CPH_v0.2_MathAppendix.md` (含导数与证明细节)
 - **Schema**: `cph.schema.json` (与产品线一致, 版本常量 `cph_version=2`)
-

附: 侧车 JSON Schema 片段

```
{
  "$id": "https://example.com/cph.schema.json",
  "$schema": "https://json-schema.org/draft/2020-12/schema",
  "title": "Cinema Pro HDR Sidecar",
  "type": "object",
  "required": ["st2094_10", "cph_meta"],
  "properties": {
    "st2094_10": {
      "type": "object",
      "required":
["minPqEncodedMaxRGB", "avgPqEncodedMaxRGB", "maxPqEncodedMaxRGB"],
      "properties": {
        "minPqEncodedMaxRGB": {"type": "number", "minimum": 0, "maximum": 10000},
        "avgPqEncodedMaxRGB": {"type": "number", "minimum": 0, "maximum": 10000},
        "maxPqEncodedMaxRGB": {"type": "number", "minimum": 0, "maximum": 10000}
      },
      "additionalProperties": false
    },
    "cph_meta": {
      "type": "object",
      "required": ["cph_version", "cph_curve_id", "pivot", "work_cs"],
      "properties": {
        "cph_version": {"type": "integer", "minimum": 2, "maximum": 2},
        "cph_curve_id": {"type": "integer", "enum": [0, 1]},
        "pivot": {"type": "number", "minimum": 0.05, "maximum": 0.30},
        "gamma_s": {"type": "number", "minimum": 1.0, "maximum": 1.6},
        "gamma_h": {"type": "number", "minimum": 0.8, "maximum": 1.4},
        "shoulder": {"type": "number", "minimum": 0.5, "maximum": 3.0},
        "black_lift": {"type": "number", "minimum": 0.0, "maximum": 0.02},
        "highlight_detail": {"type": "number", "minimum": 0.0, "maximum": 1.0},
        "sat_base": {"type": "number", "minimum": 0.0, "maximum": 2.0},
```

```
"sat_hi": {"type":"number","minimum":0.0,"maximum":2.0},
"work_cs": {"type":"string","enum":["BT2020_PQ"]},
"hash_clip_guid": {"type":"string","format":"uuid"},
"timecode_inout": {
  "type":"string",
  "pattern":"^[0-2][0-9]:[0-5][0-9]:[0-5][0-9]:[0-5][0-9]-[0-2][0-9]:[0-5][0-9]:[0-5][0-9]:[0-5][0-9]$"
},
"generator": {"type":"string"}
},
"additionalProperties": false
},
"additionalProperties": false
}
```