

# 世界模型深度解析

从 World Models 到 Dreamer 再到未来

在梦中学习：让 AI 拥有想象力

## 分享大纲

1. 为什么需要世界模型？ - 核心动机与直觉
2. **World Models (2018)** - 开山之作
3. **Dreamer 系列 (2020-2023)** - 工程化突破
4. 核心技术深度剖析 - RSSM、KL Balancing、离散潜在空间
5. 新一代方向 - Genie、JEPA、统一架构
6. 总结与展望

# 第一部分

 为什么需要世界模型？

# 人类如何学习？

## 真实体验

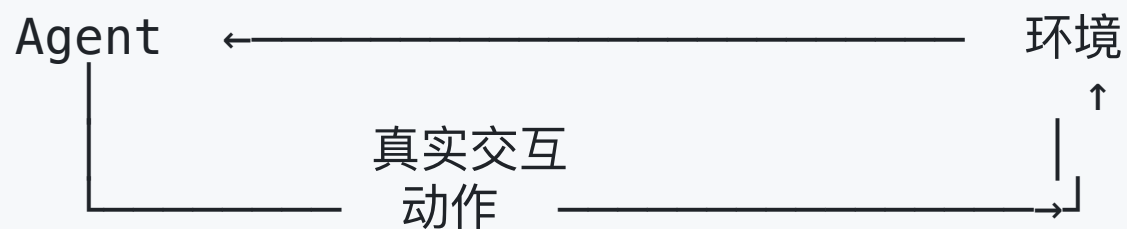
- 学开车：上路练习
- 学游泳：下水尝试
- 成本高、有风险

## 想象练习 ✨

- 脑中预演路线
- 想象动作要领
- 零成本、无风险

爱因斯坦：想象力比知识更重要

# 传统强化学习的困境



- 问题：每次学习都需要真实交互
- 样本效率低 (Atari 需要数十亿帧)
  - 真实世界交互昂贵/危险

# 世界模型的解决方案



### 核心思想：

1. 从少量真实数据学习"世界运行规律"
2. 在想象中无限练习
3. 再回到真实世界验证

# 形式化定义

世界模型 = 学习环境的转移函数

$$\hat{s}_{t+1}, \hat{r}_t = f_{\theta}(s_t, a_t)$$

给定当前状态  $s_t$  和动作  $a_t$ , 预测下一状态  $\hat{s}_{t+1}$  和奖励  $\hat{r}_t$

关键能力：

- 预测未来状态
- 评估动作后果
- 支持"心理模拟"

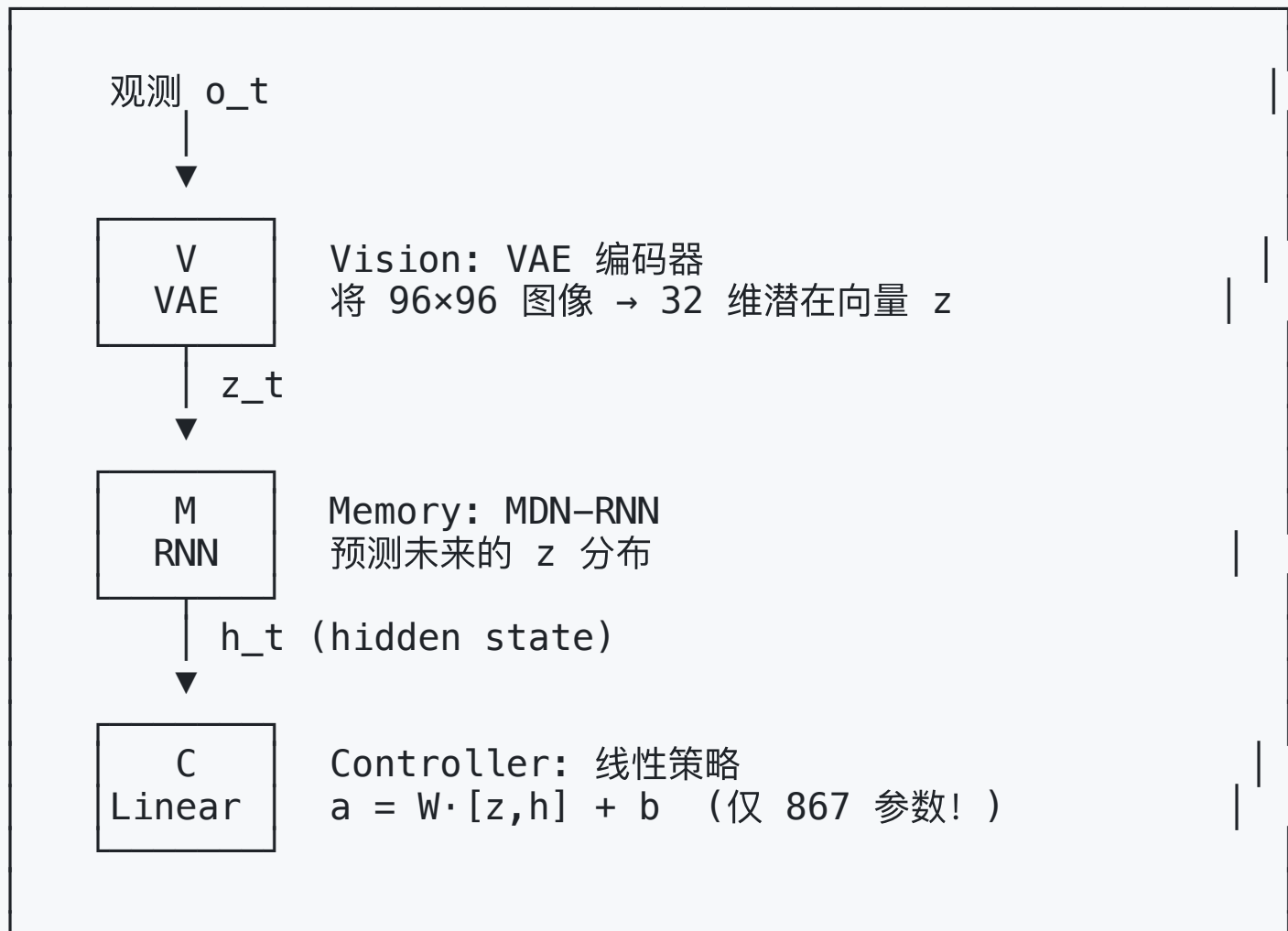
## 第二部分

### World Models (2018)

Ha & Schmidhuber 的开山之作



# 核心架构：V-M-C



# V: VAE 编码器

## 直觉

把复杂图像"压缩"成简洁表示

96×96×3 RGB

↓ 编码

32 维向量  $z$

↓ 解码

96×96×3 RGB

## 数学

编码器:  $q_{\phi}(z|x) = \mathcal{N}(\mu_{\phi}(x), \sigma_{\phi}(x))$

解码器:  $p_{\theta}(x|z)$

损失:

$$\mathcal{L} = \underbrace{\|x - \hat{x}\|^2}_{\text{重建}} + \underbrace{D_{KL}(q||p)}_{\text{正则化}}$$

# M: MDN-RNN 动态模型

## 直觉

学习"世界运行规律"

过去的  $z$   $\rightarrow$  预测未来的  $z$

$z\_1, a\_1 \rightarrow z\_2$

$z\_2, a\_2 \rightarrow z\_3$

...

## 数学

**Mixture Density Network:**

$$p(z_{t+1}) = \sum_{i=1}^K \pi_i \mathcal{N}(\mu_i, \sigma_i)$$

- $K = 5$  个高斯分量
- 建模多模态未来
- 例：球可能弹左或弹右

# C: 线性控制器 + CMA-ES

## 为什么用线性?

$$a = W \cdot [z, h] + b$$

参数量:

- $W$ :  $3 \times (32+256) = 864$
- $b$ : 3
- 总计: 867 参数

参数少  $\rightarrow$  CMA-ES 可优化

## CMA-ES 优化

```
for gen in range(300):  
    # 采样 64 个控制器  
    population = cma.ask()  
  
    # 在梦中评估  
    fitness = [dream_eval(p)  
               for p in population]  
  
    # 进化  
    cma.tell(population, fitness)
```

无梯度, 只看最终奖励

# 训练流程

## 阶段1：数据收集

随机策略探索  
收集 10000 条轨迹

## 阶段2：模型训练

VAE 训练 (10 epochs)  
MDN-RNN 训练 (20 epochs)

## 阶段3：控制器优化

CMA-ES 在梦中进化  
300 代 × 64 个体

特点：各阶段独立，分开训练

# 实验结果：CarRacing

## 性能

| 方法                  | 分数          |
|---------------------|-------------|
| 随机策略                | ~0          |
| DQN                 | ~343        |
| <b>World Models</b> | <b>~906</b> |
| 人类                  | ~800        |

## 关键发现

- 在梦中训练有效！
- 仅 867 参数的控制器
- 模型能"想象"赛道

证明了"在梦中学习"的可行性

# World Models 的局限

| 问题               | 描述                                     |
|------------------|--|
| 分阶段训练            | $V \rightarrow M \rightarrow C$ 无法联合优化 |
| 简单控制器            | 线性策略表达能力有限                             |
| <b>CMA-ES 瓶颈</b> | 参数多时效率骤降                               |
| 固定世界模型           | 训练后无法适应变化                              |

| 需要更强大的方法...

## 第三部分

### Dreamer 系列 (2020-2023)

从规划到学习的跨越



# 演进路线

2018: World Models

| 问题: 分阶段、线性控制器



2019: PlaNet

| 改进: RSSM、CEM 规划

| 问题: 每步规划太慢



2020: Dreamer V1

| 改进: Actor-Critic、想象中训练

| 问题: 连续潜在空间不稳定



2021: DreamerV2

| 改进: 离散潜在空间、KL Balancing

| 问题: 需要调参



2023: DreamerV3

| 改进: symlog、固定超参数

| 成就: 首次解决 Minecraft 钻石



# Dreamer 的核心改进

## World Models

分阶段训练  
VAE + MDN-RNN  
线性 Controller  
CMA-ES（无梯度）

## Dreamer

端到端联合训练  
RSSM（更强）  
神经网络 Actor-Critic  
策略梯度（有梯度）

# RSSM: 双路径设计

## 直觉

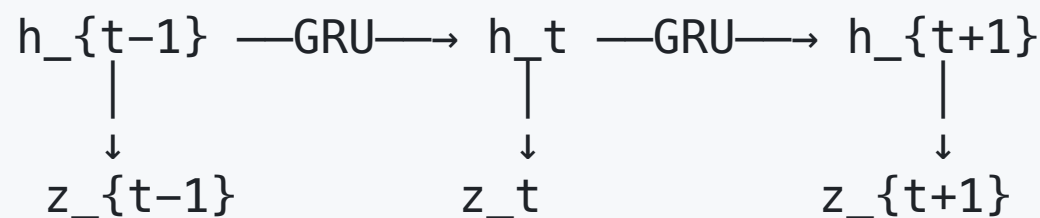
确定性  $h$ : 过去发生的是确定的

- 长期记忆
- 无损传递

随机性  $z$ : 未来是不确定的

- 多种可能
- 建模随机性

## 架构



$h$ : 确定性路径 (记忆)  
 $z$ : 随机性路径 (不确定性)

# RSSM 数学形式

确定性路径:

$$h_t = \text{GRU}_\theta([z_{t-1}, a_{t-1}], h_{t-1})$$

先验分布 (想象时用):

$$p_\theta(z_t | h_t)$$

后验分布 (训练时用):

$$q_\phi(z_t | h_t, o_t)$$

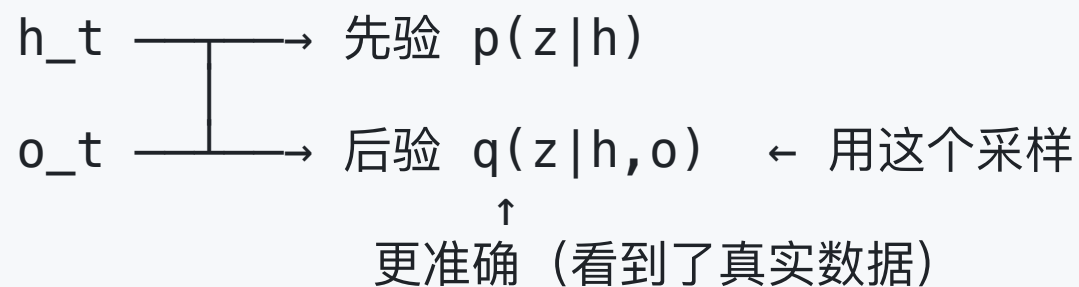
状态特征:

$$s_t = [h_t, z_t]$$

# 先验 vs 后验

训练时：有真实观测  $o_t$

---



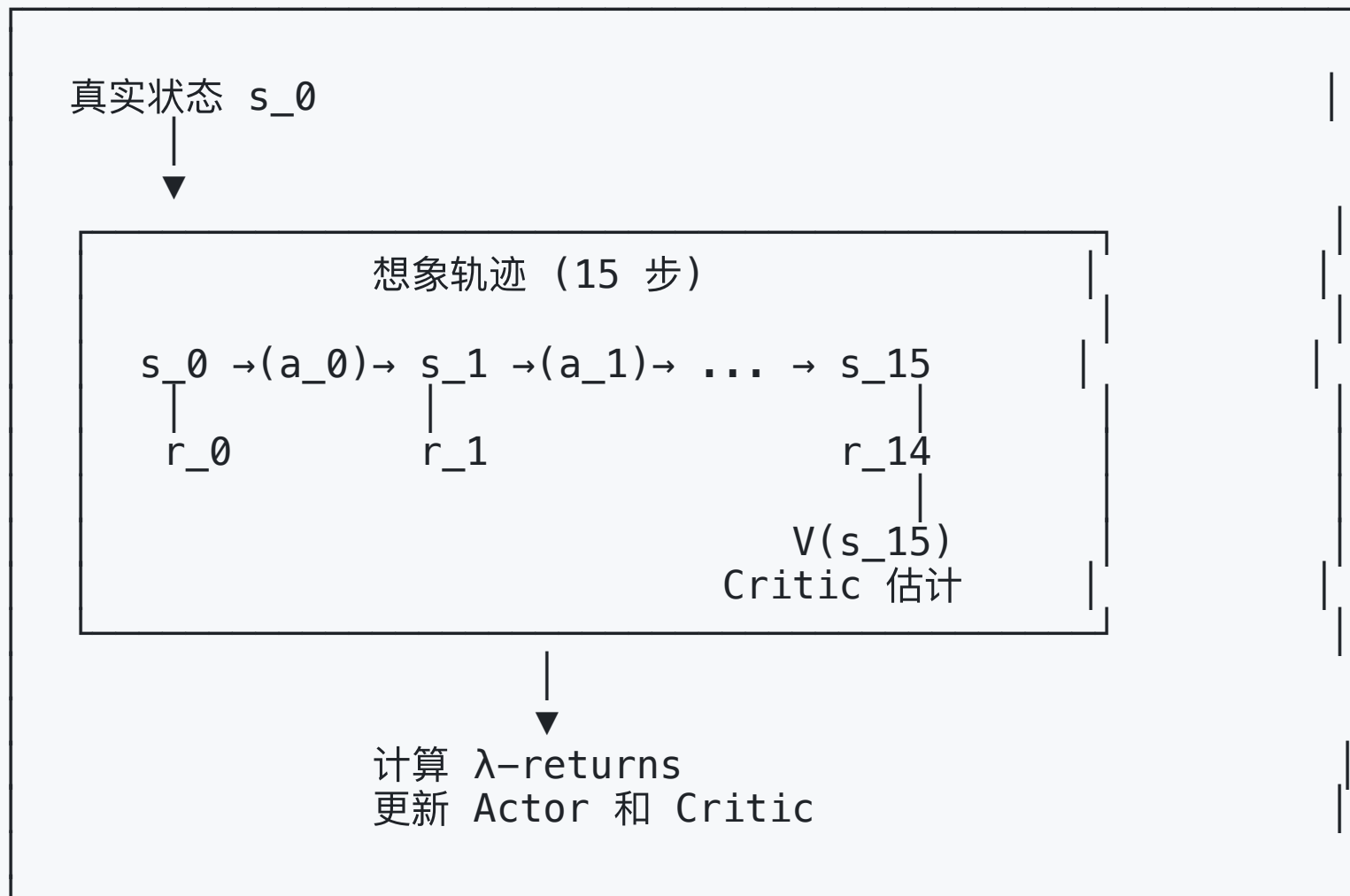
想象时：没有观测

---



KL 散度让两者尽量一致!

# 在想象中训练 Actor-Critic



# 为什么只想象 15 步？

## 有梯度 (Dreamer)

梯度误差会累积！

$\epsilon_1 \rightarrow \epsilon_2 \rightarrow \dots \rightarrow \epsilon_{15}$   
可能指数放大

需要控制步数  
但有 Critic 估计剩余价值

## 无梯度 (CMA-ES)

只看最终奖励

$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_{1000}$   
被平均掉

类比：

- Dreamer = 拿精确指南针走 15 步
- CMA-ES = 蒙眼走 1000 步凭感觉

# $\lambda$ -Returns: 平衡信任

$$V_t^\lambda = r_t + \gamma [(1 - \lambda)V(s_{t+1}) + \lambda V_{t+1}^\lambda]$$

| $\lambda$ 值                      | 含义          | 特点       |
|----------------------------------|-------------|----------|
| $\lambda=0$                      | 完全信任 Critic | 高偏差, 低方差 |
| $\lambda=1$                      | 完全用真实奖励     | 低偏差, 高方差 |
| <b><math>\lambda=0.95</math></b> | Dreamer 默认  | 平衡       |

短期用真实奖励, 长期靠 Critic 估计



# DreamerV2: 离散潜在空间

## 为什么离散?

连续  $z \sim N(\mu, \sigma^2)$ :

- "有敌人" = 0.73 ?
- 边界模糊
- 容易后验坍塌

离散  $z \sim \text{Categorical}$ :

- "有敌人" = [1, 0]
- 清晰边界
- 训练更稳定

## 具体设计

$z = [z^1, z^2, \dots, z^{32}]$

每个  $z^i$  是 32 类 one-hot  
总组合:  $32^{32} \approx \infty$

Straight-Through 梯度:

前向: argmax (离散)

反向: softmax (连续梯度)

# Straight-Through Gradient

```
def straight_through(logits):  
    probs = softmax(logits)  
  
    # 前向: 离散采样  
    indices = probs.argmax(dim=-1)  
    one_hot = F.one_hot(indices, 32)  
  
    # 反向: 假装是连续的  
    z = one_hot + probs - probs.detach()  
    #     ↑ 常数     ↑ 有梯度   ↑ 无梯度  
  
    return z
```

效果: 前向得到离散值, 反向梯度流过 `probs`

# KL Balancing

$$\mathcal{L}_{KL} = \alpha \cdot D_{KL}[\text{sg}(q) \| p] + (1 - \alpha) \cdot D_{KL}[q \| \text{sg}(p)]$$
$$\alpha = 0.8$$

传统 KL: 同时更新  $q$  和  $p$

问题: 后验  $q$  可能"躲避"到先验  $p$  覆盖的区域

DreamerV2: 分开更新

- $L_{\text{dyn}}$ : 固定  $q$ , 让  $p$  去拟合  $q \rightarrow$  先验变强
- $L_{\text{rep}}$ : 固定  $p$ , 让  $q$  向  $p$  靠拢  $\rightarrow$  后验规整

为什么偏向让先验变强?

$\rightarrow$  因为想象时只能用先验!

# DreamerV3: 通用超参数

## 核心技巧: symlog

$$\text{symlog}(x) = \text{sign}(x) \cdot \ln(|x| + 1)$$

不同任务的奖励尺度:

- Pong:  $\{-1, 0, +1\}$
- Breakout:  $[0, 400+]$
- Minecraft:  $[0, 1000+]$

symlog 压缩效果:

- $\text{symlog}(1) = 0.69$
- $\text{symlog}(100) = 4.62$
- $\text{symlog}(10000) = 9.21$

同一套超参数适用所有任务!

# 性能对比

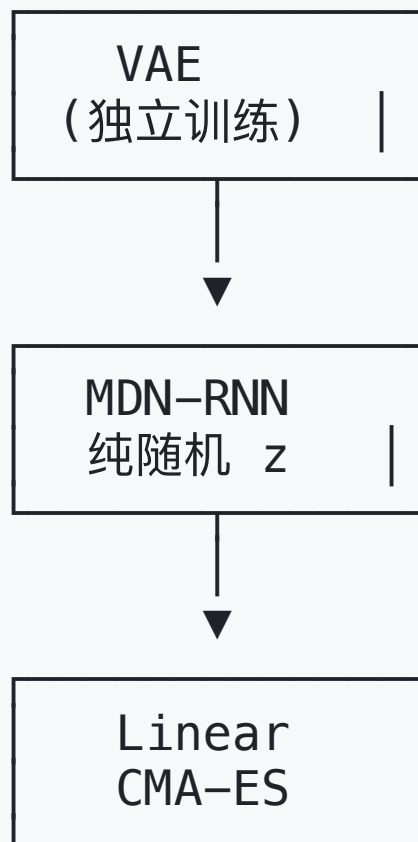
| 任务           | World Models | Dreamer V1 | V2   | V3     |
|--------------|--------------|------------|------|--------|
| CarRacing    | ~906         | -          | -    | -      |
| Atari 55 游戏  | -            | 115% 人类    | 200% | SOTA   |
| DMControl    | -            | SOTA       | SOTA | SOTA   |
| Minecraft 钻石 | -            | ✗          | ✗    | 首次成功 ✓ |

## 第四部分

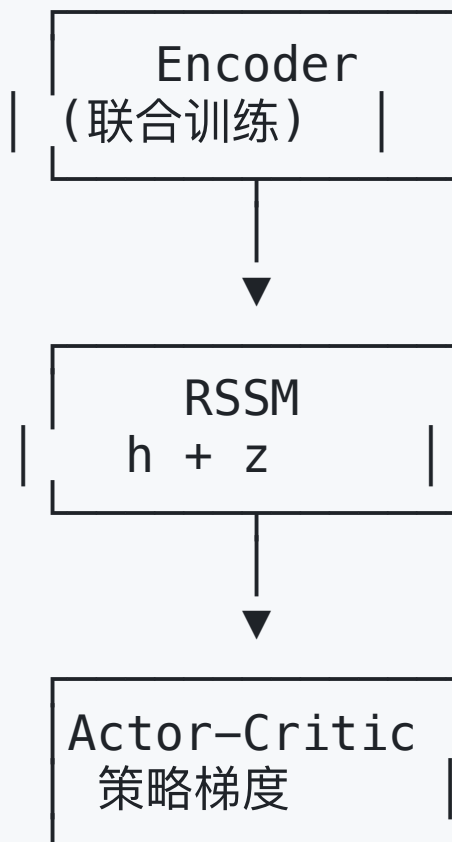
### 核心技术深度剖析

# 对比总结：架构

## World Models:



## Dreamer:



# 对比总结：训练

## World Models

阶段 1：收集数据  
          ↓（固定）  
阶段 2：训练 V, M  
          ↓（固定）  
阶段 3：进化 C

特点：流水线  
问题：无法联合优化

## Dreamer

```
while training:  
    # 交替进行  
    1. 真实环境交互  
    2. 更新世界模型  
    3. 想象 + 更新策略
```

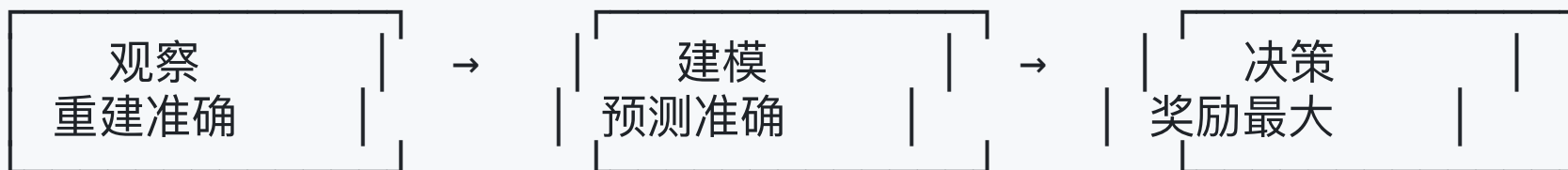
特点：持续迭代  
优势：联合优化



## 对比总结： 关键设计

| 维度   | World Models | Dreamer         |
|------|--------------|-----------------|
| 状态表示 | 纯随机 $z$      | 确定 $h$ + 随机 $z$ |
| 动态模型 | MDN (混合高斯)   | 先验 + 后验         |
| 潜在空间 | 连续           | 离散 (V2+)        |
| 策略优化 | CMA-ES       | 策略梯度            |
| 价值估计 | 无            | Critic 网络       |
| 想象长度 | ~1000 步      | ~15 步           |

# 三阶段割裂问题



问题：三个目标不完全一致！

例子：

- 世界模型完美重建背景草地纹理
- 但这对"躲避敌人"毫无帮助

理想：世界模型应该学习"对决策有用"的信息

# 第五部分

 新一代方向

# 方向 1: Genie (2024)

## 核心问题: 如何从无标签视频学习?

传统世界模型需要: (观测  $o_t$ , 动作  $a_t$ , 奖励  $r_t$ )  
必须有明确的动作标签!

互联网上的视频: 海量游戏视频、教学视频  
只有画面, 没有动作标签  
玩家按了什么键? 不知道!

Genie 的问题: 能否从纯视频中, 自动发现"动作"是什么?

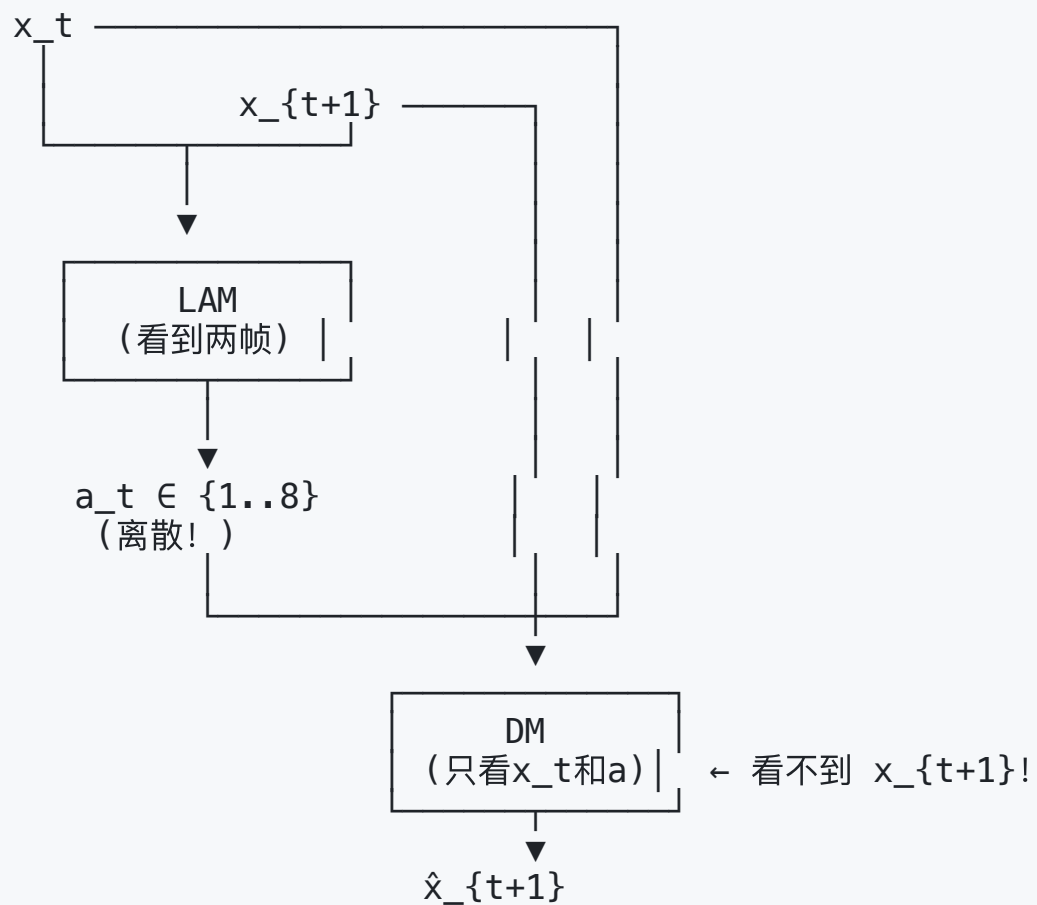
# Genie 架构：三大组件

| Genie   |  |
|---|--|
| 1. Video Tokenizer (ST-ViViT)<br>视频帧 (256×256) → 离散 token (16×16 = 256 个)                             |  |
| 2. Latent Action Model (LAM) – 核心创新!<br>从连续帧推断潜在动作: $a_t = \text{LAM}(x_t, x_{t+1})$<br>输出: 8 个离散选项之一 |  |
| 3. Dynamics Model (Transformer)<br>给定当前帧 + 动作, 预测下一帧: $x_{t+1} = \text{DM}(x_t, a_t)$                 |  |

# LAM 的信息瓶颈机制

"鸡和蛋"问题: LAM 和 DM 如何联合训练?

答案: 信息不对称 + 离散瓶颈



# 为什么必须是离散瓶颈？

## 如果 $a_t$ 是连续向量？

问题：信息泄露

LAM 可以直接把  $x_{t+1}$  的信息编码进  $a_t$

极端情况：

$a_t = \text{Encoder}(x_{t+1})$

$\hat{x} = \text{Decoder}(a_t)$

Loss = 0, 完美!

但  $a_t$  毫无语义

## 离散瓶颈 (8 选 1)

$a_t$  只有 3 bit 信息

LAM 无法把像素细节塞进去  
只能传递"最本质的变化"

结果：

$a_t = 1 \rightarrow$  "角色向左"

$a_t = 2 \rightarrow$  "角色向右"

$a_t = 3 \rightarrow$  "角色跳跃"

...

**关键 Trade-off:** 不需要动作标签，但动作空间被限制为  $K$  个离散选项

# Genie 的效果与局限

获得:

- + 可以用海量无标签视频 (YouTube、网络视频)
- + 自动发现"有意义"的动作
- + 从草图生成可玩游戏

付出:

- 动作空间被限制为  $K$  个离散选项
- $K$  太小  $\rightarrow$  表达力不足 (无法表达复杂动作)
- $K$  太大  $\rightarrow$  回到信息泄露问题

本质: 用"动作空间的先验假设"换"不需要标签"



# 方向 2: LeCun 的 JEPA

## LeCun 对生成式方法的批评

"你们都在预测像素（或像素的压缩表示）"

"为什么要预测草地上每片叶子的位置？"

"这些细节对决策有用吗？"

生成式 (Dreamer/Genie):

$x_t \rightarrow \text{Encoder} \rightarrow z_t \rightarrow \text{Decoder} \rightarrow \hat{x}_{t+1}$

必须预测所有像素细节

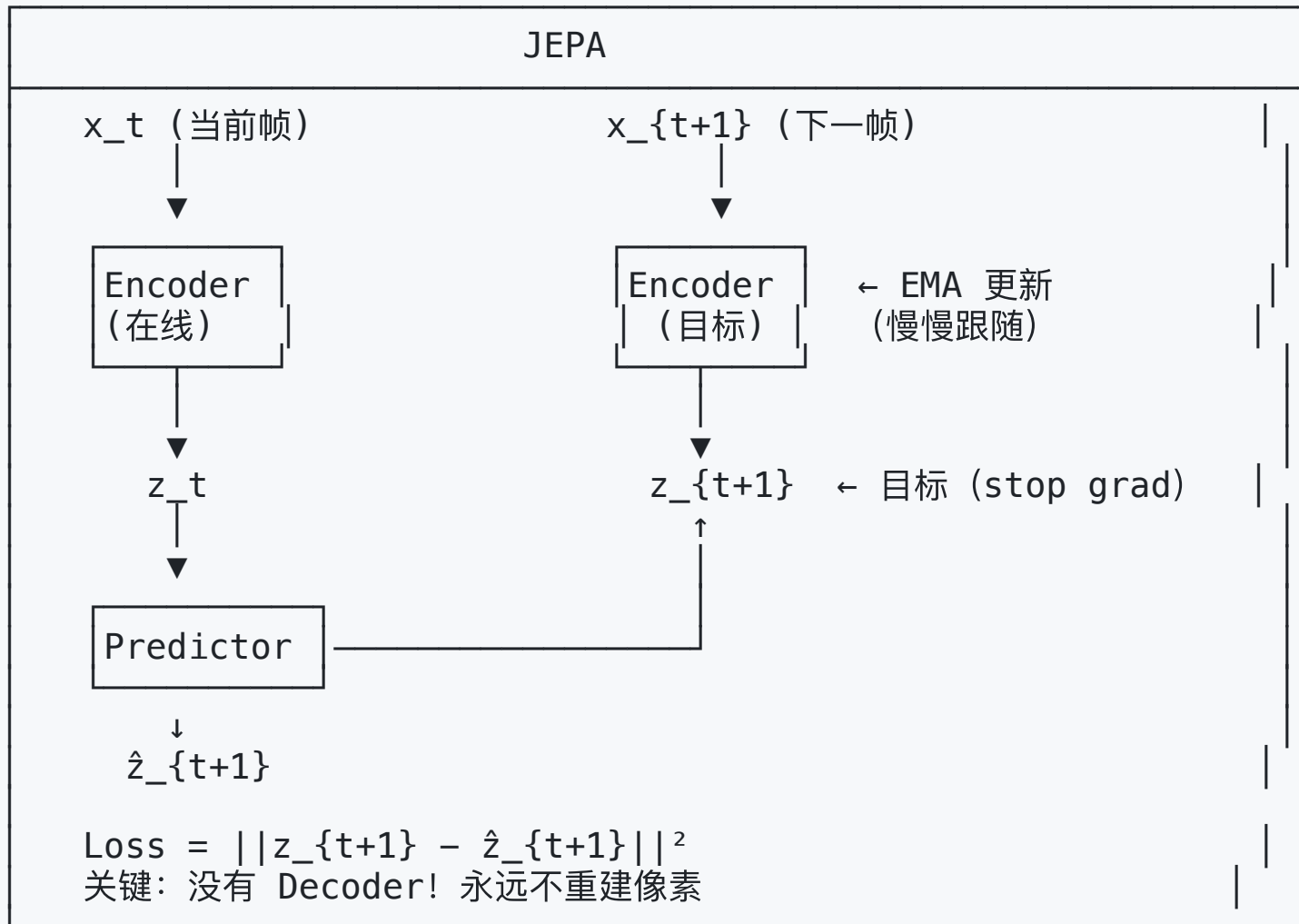
JEPA (判别式):

$x_t \rightarrow \text{Encoder} \rightarrow z_t \rightarrow \text{Predictor} \rightarrow \hat{z}_{t+1}$

$x_{t+1} \rightarrow \text{Encoder} \rightarrow z_{t+1}$  (目标)

只预测"重要的"抽象特征, 永远不碰像素!

# JEPA 架构与 EMA



# EMA 防止表示坍缩

## 问题：常数输出

如果 Encoder 学到：

$z_t = [0, 0, 0, \dots]$

$z_{t+1} = [0, 0, 0, \dots]$

$\hat{z}_{t+1} = [0, 0, 0, \dots]$

Loss = 0, 完美!

但表示毫无信息

→ 表示坍缩

## EMA 解决方案

在线 Encoder: 正常训练

目标 Encoder: EMA 更新

$$\theta_{\text{target}} = 0.99 \times \theta_{\text{target}} + 0.01 \times \theta_{\text{online}}$$

类比：

领跑者停下 → 跟随者还在追

→ 领跑者必须继续跑

# JEPA 的关键优势

vs Dreamer: 不需要假设分布!

Dreamer:

先验  $p(z|h) = \text{Categorical}(32 \times 32)$   $\leftarrow$  必须指定分布形式

后验  $q(z|h, o) = \text{Categorical}(32 \times 32)$

用 KL 散度约束, 需要调节 KL 权重、free bits 等

JEPA:

$z_t = \text{Encoder}(x_t)$   $\leftarrow$  就是一个向量, 不是分布

用 MSE 直接比较, 简单直接

不假设任何分布!

另一个特点: JEPA 不建模不确定性

Dreamer:  $p(z_{t+1})$  是分布, 可以采样多种可能

JEPA:  $\hat{z}_{t+1}$  是确定性预测

LeCun 的观点: 低层不确定性 (像素级) 对决策无关

# JEPA vs 生成式

| 方面    | 生成式 (Dreamer) | JEPA |
|-------|---------------|------|
| 预测目标  | 像素/token      | 表示   |
| 解码器   | 需要            | 不需要  |
| 分布假设  | 需要 (高斯/离散)    | 不需要  |
| 不确定性  | 显式建模          | 不建模  |
| 计算效率  | 较低            | 较高   |
| RL 应用 | 成熟            | 探索中  |

LeCun: "预测像素是错误的方向"

## 方向 3：统一 Transformer 架构

输入序列：[obs\_1, act\_1, rew\_1, obs\_2, act\_2, ...]

↓ Transformer ↓

输出：预测下一个 token

代表工作：

- Decision Transformer: RL 变成序列建模
- Gato: 一个模型做所有任务
- RT-2: 视觉-语言-动作统一

# Decision Transformer 深度解析

## 核心思想：把 RL 变成序列建模

传统 RL:

学习  $V(s)$  或  $Q(s, a) \rightarrow$  用价值函数优化策略

依赖 Bellman 方程:  $V(s) = r + \gamma V(s')$

Decision Transformer:

把轨迹看成序列:  $\tau = (\hat{R}_1, s_1, a_1, \hat{R}_2, s_2, a_2, \dots)$

学习条件生成:  $P(a_t \mid \hat{R}_t, s_t, \text{历史})$

$\hat{R}_t = \text{Return-to-Go} =$  从  $t$  到结束的累积奖励

关键洞察：不预测“最优动作”，而是“想要 X 分时该怎么做”

# Credit Assignment: TD vs DT

## 类比：RNN vs Transformer 的信息传播

TD Learning (类似 RNN):



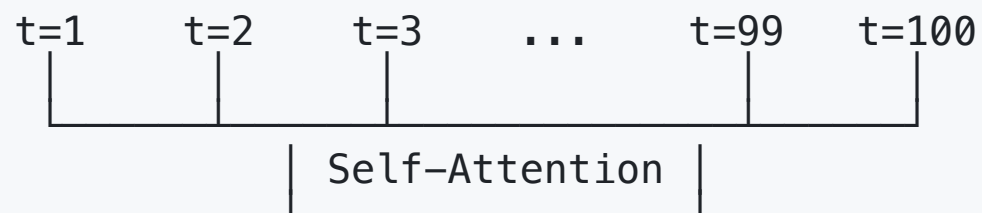
奖励必须逐步反向传播

$$V(s_{99}) \leftarrow r + \gamma V(s_{100})$$

$$V(s_{98}) \leftarrow r + \gamma V(s_{99})$$

... 需要 99 次迭代! 误差逐步累积

Decision Transformer (类似 Transformer):



任意位置直接建立关联!



# 为什么 DT 避开了 RL 的"致命三角"?

RL 的致命三角 (Deadly Triad):

1. Function Approximation (神经网络估计)
2. Bootstrapping (用估计值更新估计值)
3. Off-policy Learning (学习非当前策略的数据)

三者同时存在 → 训练不稳定、发散

Decision Transformer 如何绕过?

- x 不需要 Bootstrapping
  - TD:  $V(s) \leftarrow r + \gamma \cdot \hat{V}(s')$  ← 用估计更新估计
  - DT: 直接用真实的  $R_t$ , 不估计任何价值函数
- x 不需要 Value Function
  - 不学  $V(s)$ , 不学  $Q(s,a)$
  - 只学  $P(a \mid \hat{R}, s)$ , 纯监督学习
- ✓ 可以 Off-policy
  - 在任意历史数据上训练
  - 推理时指定目标  $\hat{R}$  生成动作

# DT vs TD: 稀疏奖励场景

任务：100 步迷宫，只有终点 +1 奖励

TD Learning 的困境：

步骤 1-99:  $r = 0$

步骤 100:  $r = 1$

$$V(s_{99}) \leftarrow 0 + \gamma \cdot 1 = \gamma$$

第 1 轮学到

$$V(s_{98}) \leftarrow 0 + \gamma^2 = \gamma^2$$

第 2 轮学到

...

$$V(s_1) \leftarrow \gamma^{99}$$

第 99 轮才学到！

+ 每轮估计误差累积...

Decision Transformer:

训练数据:  $(\hat{R}=1, s_1, a_1), (\hat{R}=1, s_2, a_2), \dots$

Self-Attention 直接学到:

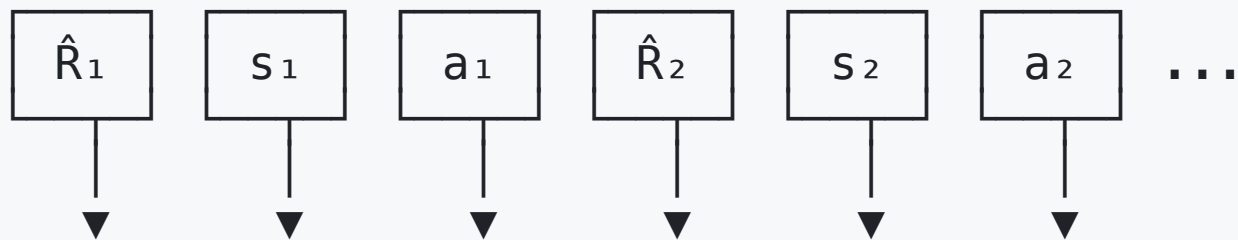
" $\hat{R}=1$  时在  $s_1$  执行  $a_1$ "

" $\hat{R}=1$  时在  $s_{50}$  执行  $a_{50}$ "

一次训练, 全局 credit assignment!

# DT 的架构细节

输入序列（交错排列）：



Linear Embedding + Timestep PE



GPT (Causal Self-Attention)



预测  $a_t$ （动作位置）

训练：Loss = MSE( $a_{pred}$ ,  $a_{true}$ ) # 纯监督！

推理：设定  $\hat{R}_1$  = 目标回报，自回归生成动作

# DT 的局限性

1. 依赖数据质量
  - 只能生成"数据中见过的"行为
  - 无法超越数据集中的最优轨迹
  - vs Dreamer: 可以在想象中探索新策略
2. 不学习世界模型
  - 不理解"世界如何运转"
  - 只学"好轨迹长什么样"
  - 无法做 planning 或 model-based 推理
3. 离线 RL 为主
  - 需要大量离线数据
  - 在线学习场景不如传统 RL
4. Return 条件化的挑战
  - 推理时需要设定合理的目标  $\hat{R}$
  - 设太高 → 生成不出来的动作
  - 设太低 → 表现不佳

# World Models vs Decision Transformer

| 维度                | World Models/Dreamer | Decision Transformer     |
|-------------------|----------------------|--------------------------|
| 核心思想              | 学习世界如何运转             | 学习好轨迹长什么样                |
| 学习目标              | 状态转移 $P(s'   s, a)$  | 动作生成 $P(a   \hat{R}, s)$ |
| 是否学世界模型           | 是                    | 否                        |
| 能否 Planning       | 是（想象中规划）             | 否                        |
| 能否超越数据            | 是（想象中探索）             | 否（受限于数据）                 |
| Credit Assignment | Bellman backup       | Self-Attention           |
| 稀疏奖励              | 困难                   | 自然处理                     |
| 在线学习              | 强                    | 弱                        |

本质区别：

- World Models: "理解世界" → 想象 → 决策

# 三方对比：哲学分歧

三种方法都在回答同一个问题：如何让 AI 理解世界的运行规律？

Dreamer: "给我标注好的交互数据，我学完整的世界动态"  
需要动作标签，但动作空间灵活

Genie: "只给视频就行，但我只能学有限种动作"  
不需要标签，但动作空间受限（8 个离散选项）

JEPA: "我不关心动作，只学习状态的抽象表示"  
不涉及动作，专注于表示学习

# 三方对比：功能表格

| 维度       | Dreamer     | Genie    | JEPA |
|----------|-------------|----------|------|
| 预测目标     | 潜在状态分布 + 像素 | 像素 token | 抽象表示 |
| 需要解码器    | 是           | 是        | 否    |
| 需要动作标签   | 是           | 否        | N/A  |
| 动作空间     | 环境定义（灵活）    | 预设离散     | N/A  |
| 分布假设     | 需要          | 不需要      | 不需要  |
| 建模不确定性   | 显式 (KL)     | 隐式       | 不建模  |
| RL 应用成熟度 | 高           | 中        | 低    |

# 核心 Trade-off: 没有免费的午餐

## 没有免费的午餐

### Dreamer:

获得: 灵活的动作空间, 完整的世界动态

付出: 需要动作标签, 需要假设分布

### Genie:

获得: 不需要动作标签, 可用海量视频

付出: 动作空间受限 (预设离散选项)

### JEPA:

获得: 不假设分布, 计算高效, 表示抽象

付出: 不建模不确定性, 不涉及动作, RL 应用不成熟



# 方向 4: Diffusion World Models

## 苏格拉底式追问：压缩的代价是什么？

问：把 64×64 图像压缩成 32 个离散 token，会丢失什么？

答：视觉细节——小物体位置、精细纹理、微妙变化

问：什么任务会受影响？

答：需要精确判断位置的任务

- Boxing：需要看清对手拳头位置
- Breakout：需要追踪快速移动的球
- 自动驾驶：远处的行人和交通灯

问：有没有生成模型可以保留这些细节？

答：扩散模型！DALL-E、Stable Diffusion 的成功证明了这一点

# VAE vs Diffusion: 生成方式的本质区别

VAE (Dreamer):

噪声  $z$   $\longrightarrow$  一次解码  $\longrightarrow$  图像

类比: 一笔画出整幅画

优点: 快

缺点: 难以画出精细细节

Diffusion (DIAMOND):

纯噪声  $\longrightarrow$  去噪一点  $\longrightarrow$  去噪一点  $\longrightarrow \dots \longrightarrow$  图像

类比: 雕塑家从大理石一点点雕出雕像

优点: 可以精雕细琢

缺点: 需要很多步

# DIAMOND: 在 Atari 上超越 DreamerV3

关键发现：视觉细节很重要！

DreamerV3 的离散潜在空间：

32×32 categorical → 信息瓶颈 → 丢失细节

DIAMOND 的扩散预测：

迭代去噪 → 精确重建 → 保留细节

某些 Atari 游戏需要精确的像素级信息  
(比如小球的精确位置)

| 方法             | Atari 100K  | 说明     |
|----------------|-------------|--------|
| SimPLe         | 0.44        | 早期世界模型 |
| DreamerV3      | 1.03        | 离散潜在空间 |
| <b>DIAMOND</b> | <b>1.46</b> | 扩散世界模型 |

# 计算量的 Trade-off

问：世界模型需要预测 15 步，每步扩散需要 20 次去噪，意味着？

答：计算量爆炸！

Dreamer: 15 步  $\times$  1 次前向 = 15 次网络调用

DIAMOND: 15 步  $\times$  20 次去噪 = 300 次网络调用

问：那 DIAMOND 为什么还能在 Atari 上赢？

答：预测质量的提升弥补了速度的损失

在视觉细节重要的游戏上，准比快更重要

# Diffusion vs VAE/Discrete

| 维度   | VAE-based (Dreamer) | Diffusion-based |
|------|---------------------|-----------------|
| 生成方式 | 一步到位                | 迭代精炼            |
| 分布假设 | 高斯/离散               | 无假设             |
| 生成质量 | 可能模糊                | 高质量、清晰          |
| 多模态  | 需要特殊设计              | 天然支持            |
| 推理速度 | 快 (1次)              | 慢 (10-20次)      |

核心 Trade-off: 用更多计算换取更高质量预测

# 三种哲学：预测什么？

Dreamer:  $x \rightarrow z \rightarrow \text{预测 } z' \rightarrow \text{解码成 } x'$   
"压缩后预测，再解码"

DIAMOND:  $x \rightarrow \text{直接预测 } x' \text{ (像素)}$   
"直接预测像素，保留细节"

JEPA:  $x \rightarrow z \rightarrow \text{预测 } z' \rightarrow \text{不解码!}$   
"只预测抽象表示，永不解码"

LeCun 的问题：草地上每片叶子的位置对开车有用吗？

# 适用场景选择

## 选择 Dreamer

- 实时性要求高
- 计算资源有限
- 决策主要依赖高层语义
- 例：大多数 Atari 游戏

## 选择 Diffusion

- 需要检测远处小目标
- 安全性要求高（宁慢但准）
- 计算资源充足
- 例：自动驾驶、机器人操作

## 选择 Genie

- 有大量无标签视频
- 动作空间相对简单
- 想从视频创建可交互环境

## 选择 JEPA

- 不需要生成可视化
- 追求极致效率
- 主要做抽象推理

# 未来展望

第一代 (2018): World Models  
证明"在梦中学习"可行

第二代 (2020-2023): Dreamer 系列  
端到端、强大性能

第三代 (2024+): 多路线并进

- 大规模视频预训练 (Genie)
- 扩散世界模型 (DIAMOND, UniSim)
- 抽象表示预测 (JEPA)
- 语言集成 (RT-2)
- 序列建模 (Decision Transformer)



# 第六部分



## 总结

# 核心洞察

## 1. 确定性 + 随机性分离

h 负责记忆, z 负责随机性  
类比: Transformer 的残差连接也是"确定性路径"

## 2. 短视野 + 价值估计 > 长视野

有了 Critic, 不需要想象太远  
 $V(s)$  压缩了"未来所有信息"

## 3. 离散表示更稳定

连续空间容易"漂移"和"坍缩"  
离散空间有明确的边界

# Causal Confusion: 更多信息反而更差

de Haan et al., 2019 的惊人发现

实验设计:

场景 A: 输入包含仪表盘(刹车灯) + 挡风玻璃

场景 B: 只有挡风玻璃, 仪表盘被遮挡

结果:

场景 A (更多信息): 训练误差低, 实际驾驶差

场景 B (更少信息): 训练误差高, 实际驾驶好!

原因:

模型 A 学到 "刹车灯亮 → 踩刹车"

但刹车灯是结果, 不是原因!

启示: 世界模型可能学到相关性而非因果性

# 开放问题

## 1. 什么是"好的"世界模型?

重建准确? 决策有用? 泛化能力? 因果正确?

## 2. 相关性 vs 因果性

如何让世界模型学习真正的因果结构?

## 3. 与大语言模型的关系?

LLM 是否已经是某种世界模型?

## 4. 从模拟到现实

如何跨越 Sim2Real 的鸿沟?

# 实践建议

## 用 World Models

- 简单任务
- 快速原型
- 需要可解释性
- 计算资源有限

## 用 Dreamer

- 复杂任务
- 追求性能
- 持续学习
- 有足够算力

# 资源

## 论文:

- World Models (2018): [arxiv.org/abs/1803.10122](https://arxiv.org/abs/1803.10122)
- Dreamer (2020): [arxiv.org/abs/1912.01603](https://arxiv.org/abs/1912.01603)
- DreamerV3 (2023): [arxiv.org/abs/2301.04104](https://arxiv.org/abs/2301.04104)
- Genie (2024): [arxiv.org/abs/2402.15391](https://arxiv.org/abs/2402.15391)

## 代码:

- 官方 DreamerV3: [github.com/danijar/dreamerv3](https://github.com/danijar/dreamerv3)
- PyTorch 复现: [github.com/NM512/dreamerv3-torch](https://github.com/NM512/dreamerv3-torch)

 谢谢!

Q&A

# 附录：核心公式速查

| 组件                 | 公式  |
|--------------------|---|
| VAE ELBO           | $\log p(x) \geq \mathbb{E}_q[\log p(x$  |
| RSSM 确定性           | $h_t = \text{GRU}([z_{t-1}, a_{t-1}], h_{t-1})$                                 |
| RSSM 先验            | $p(z_t h_t) = \prod_i \text{Cat}(\pi^i(h_t))$                                   |
| $\lambda$ -Returns | $V_t^\lambda = r_t + \gamma[(1 - \lambda)V(s_{t+1}) + \lambda V_{t+1}^\lambda]$ |
| KL Balance         | $\alpha \cdot D_{KL}[sg(q) p] + (1 - \alpha) \cdot D_{KL}[q sg(p)]$             |
| Symlog             | $\text{symlog}(x) = \text{sign}(x) \cdot \ln($                                  |



## 附录：演进时间线

|         |                               |
|---------|-------------------------------|
| 2018.03 | World Models 发布               |
| 2019.02 | PlaNet 引入 RSSM                |
| 2020.01 | Dreamer V1 Actor-Critic       |
| 2021.01 | DreamerV2 离散潜在空间, Atari 超越人类  |
| 2022.06 | LeCun 发布 JEPA 路线图             |
| 2022.11 | Gato 通用智能体                    |
| 2023.01 | DreamerV3 通用超参数, 解决 Minecraft |
| 2023.04 | I-JEPA 图像自监督                  |
| 2024.02 | Genie 从视频学习可控世界               |
| 2024.02 | V-JEPA 视频自监督                  |