保证引导程序组合正确性的可编程 MCMC

王迪
北京大学
wangdi95@pku.edu.cn
2024 年 11 月 15 日

发表于 OOPSLA'24
与 Long Pham， Feras Saad 和 Jan Hoffmann 的合作工作

但今天我不想（只）讲这个……

但今天我不想（只）讲这个……

「介绍在**科研选题**、破题、实验、写作以及推广应用等方面的经验和教训。」

–顶会顶刊论坛

–我最常被问到的几个问题

「为啥研究编程语言？」

–我最常被问到的几个问题

「为啥研究**编程语言**？」

「有什么好研究的？」

–我最常被问到的几个问题

「为啥研究**编程语言**？」

「有什么好研究的？」

「你做出啥语言了？」

–我最常被问到的几个问题

编程语言领域研究些什么？

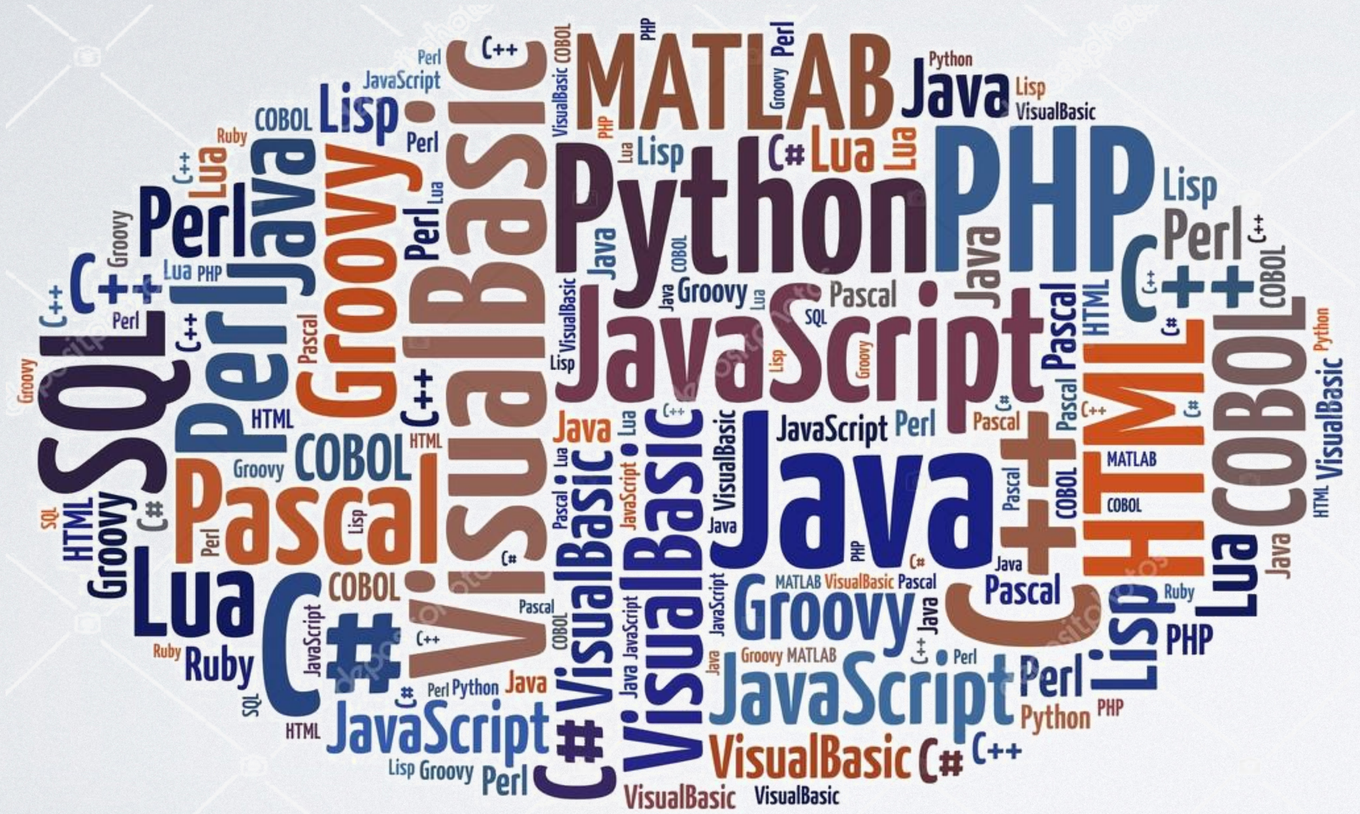
编程语言领域研究些什么？

- 研究怎么造编程语言？

编程语言领域研究些什么？

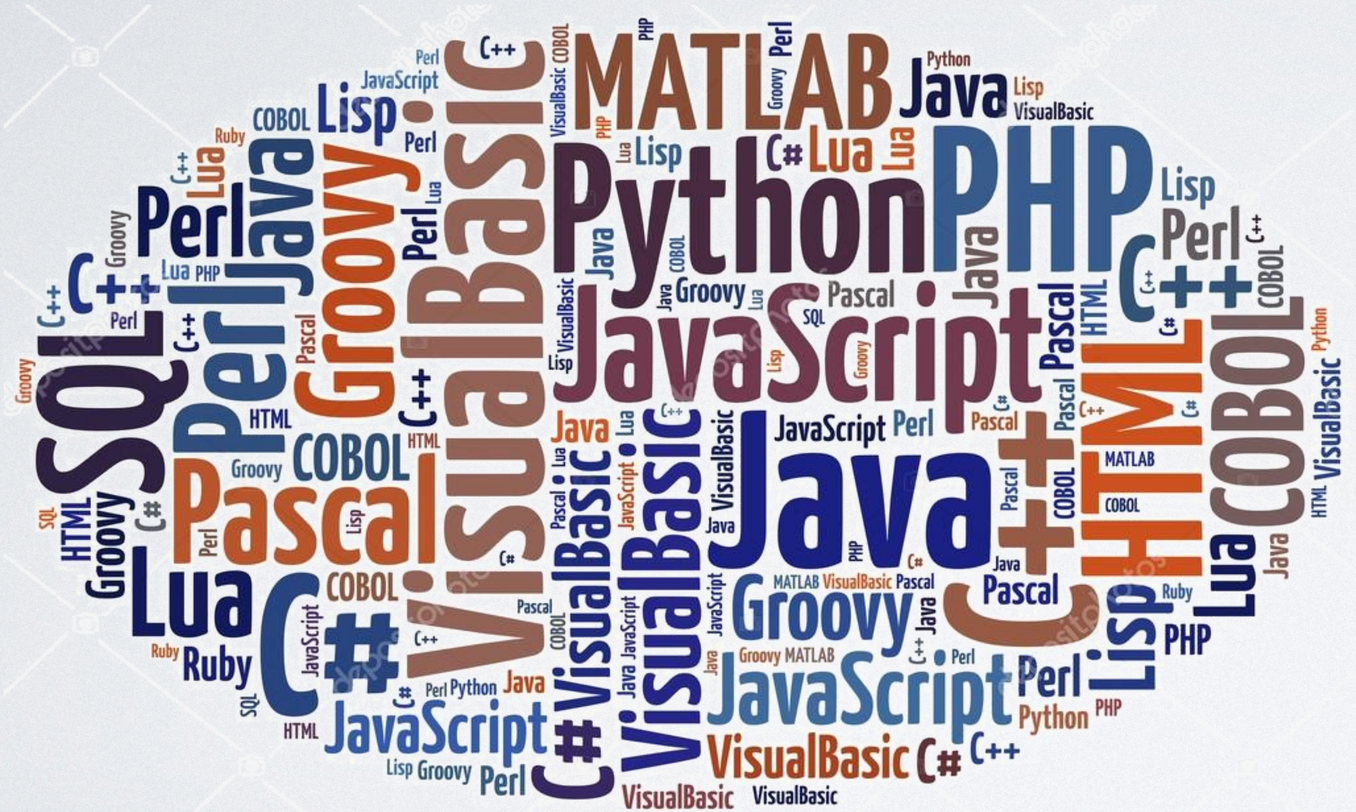
- 研究怎么造编程语言？
  - 既是，也不是

编程语言领域研究些什么？



- 研究怎么造编程语言？
  - 既是，也不是
- 为啥有这么多编程语言？

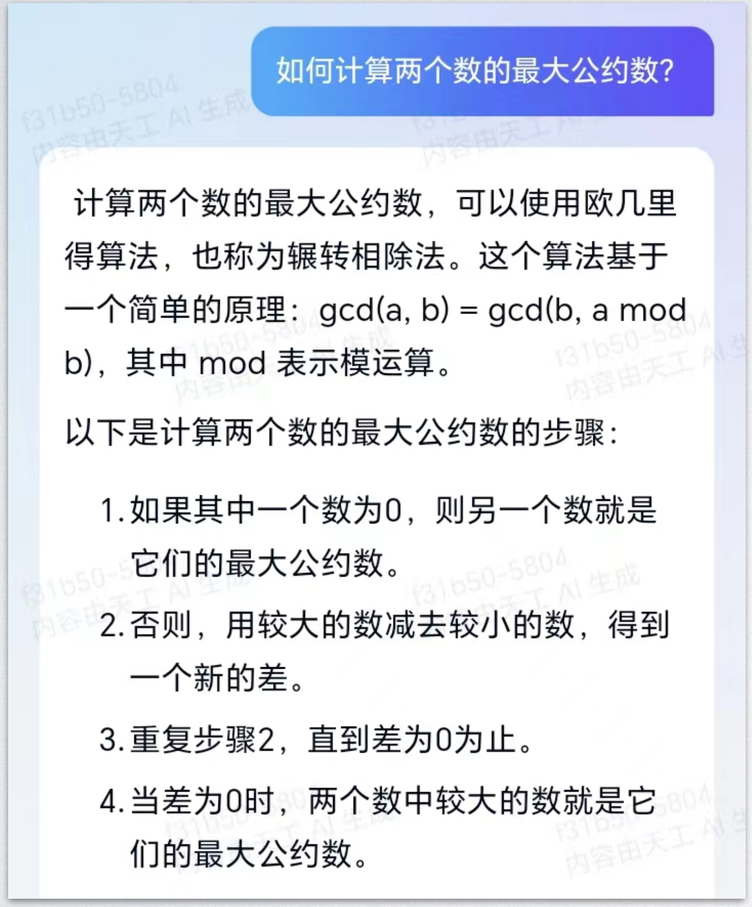
编程语言领域研究些什么？



- 研究怎么造编程语言？
  - 既是，也不是
- 为啥有这么多编程语言？
- 编程语言的本质是什么？

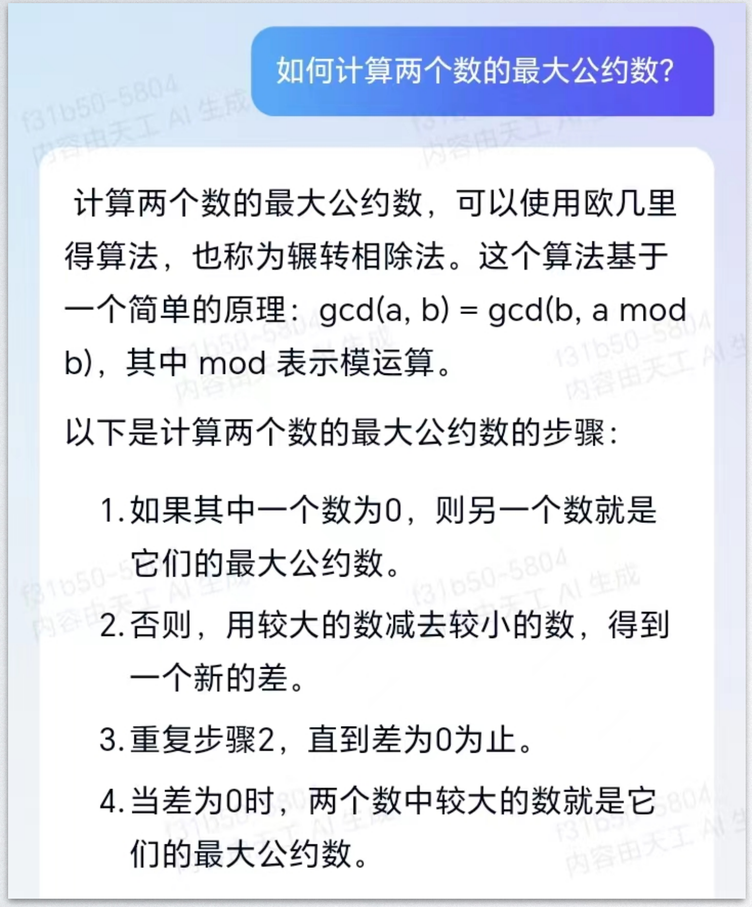
编程语言与计算

编程语言与计算



意识中的计算

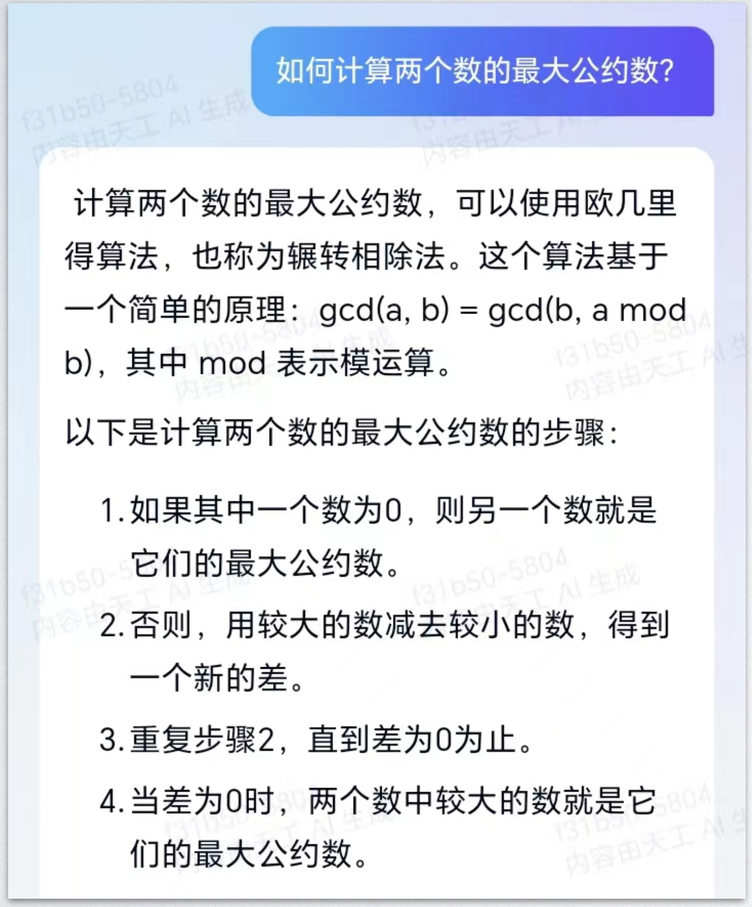
编程语言与计算



意识中的计算

硬件上的计算

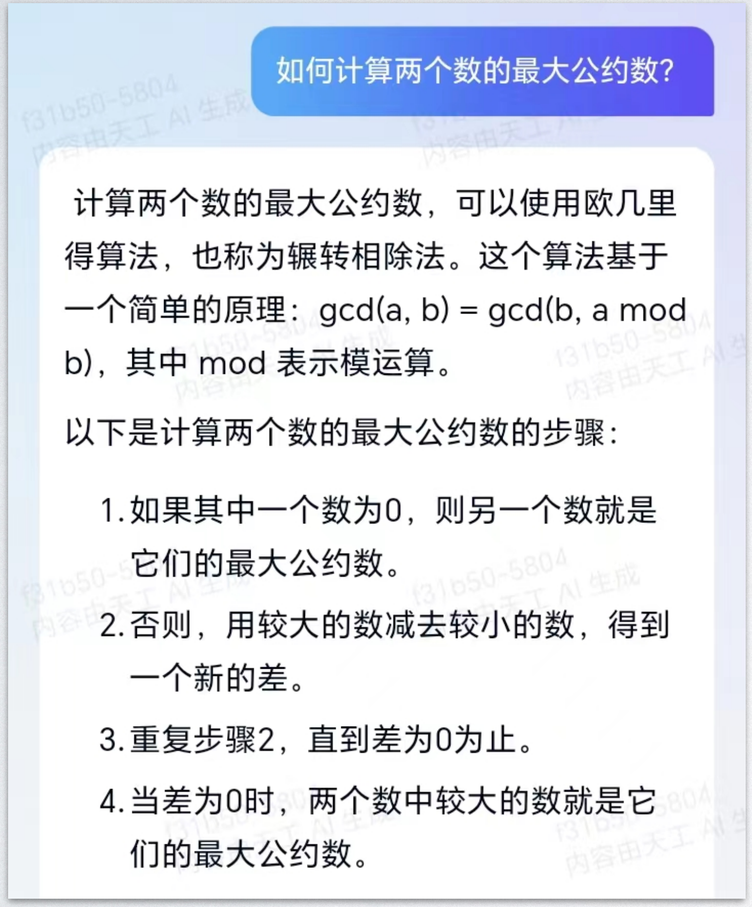
编程语言与计算



意识中的计算

硬件上的计算

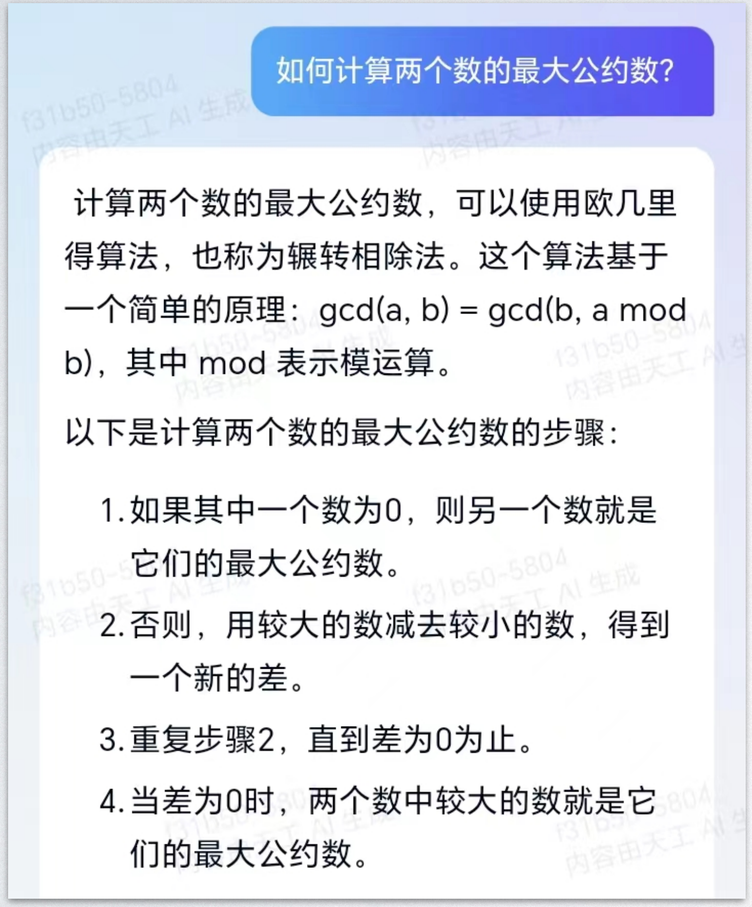
编程语言与计算




```c
int gcd(int a, int b) {
  while (b != 0) {
    int t = b;
    b = a % b;
    a = t;
  }
  return a;
}
```

意识中的计算 → 程序 → 硬件上的计算

编程语言与计算



编程语言：C

```c
int gcd(int a, int b) {
  while (b != 0) {
    int t = b;
    b = a % b;
    a = t;
  }
  return a;
}
```

意识中的计算 → 程序 → 硬件上的计算

编程语言：驾驭计算的基本工具

编程语言：驾驭计算的基本工具

「计算两个数的最大公约数」

编程语言：驾驭计算的基本工具

「计算两个数的最大公约数」

「解一个数独」

编程语言：驾驭计算的基本工具

计算任务

「计算两个数的最大公约数」

「解一个数独」

编程语言：驾驭计算的基本工具

计算任务

「计算两个数的最大公约数」

「解一个数独」

「判断一张图片是不是人脸」

编程语言：驾驭计算的基本工具

计算任务

「计算两个数的最大公约数」

「解一个数独」

「判断一张图片是不是人脸」

「给出一个棋盘状态下的最优决策」

编程语言：驾驭计算的基本工具

计算任务

「计算两个数的最大公约数」

「解一个数独」

「判断一张图片是不是人脸」

「给出一个棋盘状态下的最优决策」

「写一首李白风格的关于火锅的现代诗」

编程语言：驾驭计算的基本工具

计算任务

「计算两个数的最大公约数」

「解一个数独」

「判断一张图片是不是人脸」

「给出一个棋盘状态下的最优决策」

「写一首李白风格的关于火锅的现代诗」

「生成一张黑色柴犬在雪地的图片」

编程语言：驾驭计算的基本工具

计算任务

「计算两个数的最大公约数」

「解一个数独」

「判断一张图片是不是人脸」

「给出一个棋盘状态下的最优决策」

「写一首李白风格的关于火锅的现代诗」

「生成一张黑色柴犬在雪地的图片」

计算实现

CPU

GPU

TPU

FPGA

……

编程语言：驾驭计算的基本工具

计算任务

「计算两个数的最大公约数」

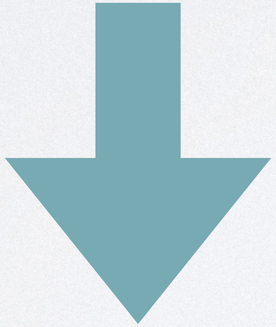
「解一个数独」

「判断一张图片是不是人脸」

「给出一个棋盘状态下的最优决策」

「写一首李白风格的关于火锅的现代诗」

「生成一张黑色柴犬在雪地的图片」



计算实现

CPU　GPU　TPU　FPGA　……

编程语言：驾驭计算的基本工具

计算任务

「计算两个数的最大公约数」

「解一个数独」

「判断一张图片是不是人脸」

「给出一个棋盘状态下的最优决策」

「写一首李白风格的关于火锅的现代诗」

「生成一张黑色柴犬在雪地的图片」

用编程语言为计算任务写程序

计算实现

CPU　GPU　TPU　FPGA　……

编程语言：驾驭计算的基本工具

计算任务

「计算两个数的最大公约数」

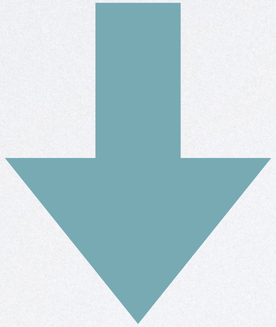
「解一个数独」

「判断一张图片是不是人脸」

「给出一个棋盘状态下的最优决策」

「写一首李白风格的关于火锅的现代诗」

「生成一张黑色柴犬在雪地的图片」



用编程语言为计算任务写程序

编译器自动把程序转换为计算实现

计算实现

CPU　GPU　TPU　FPGA　……

为啥有这么多编程语言?

为啥有这么多编程语言?

机器语言

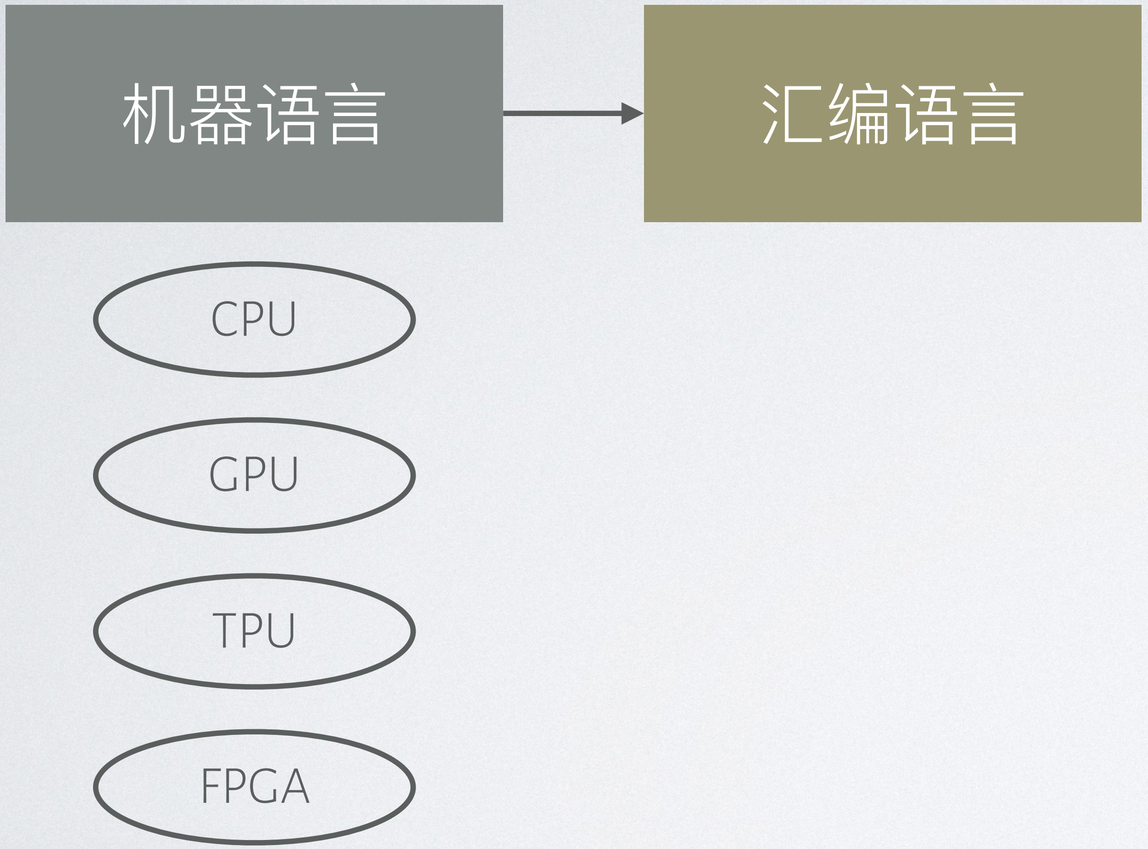
CPU

GPU

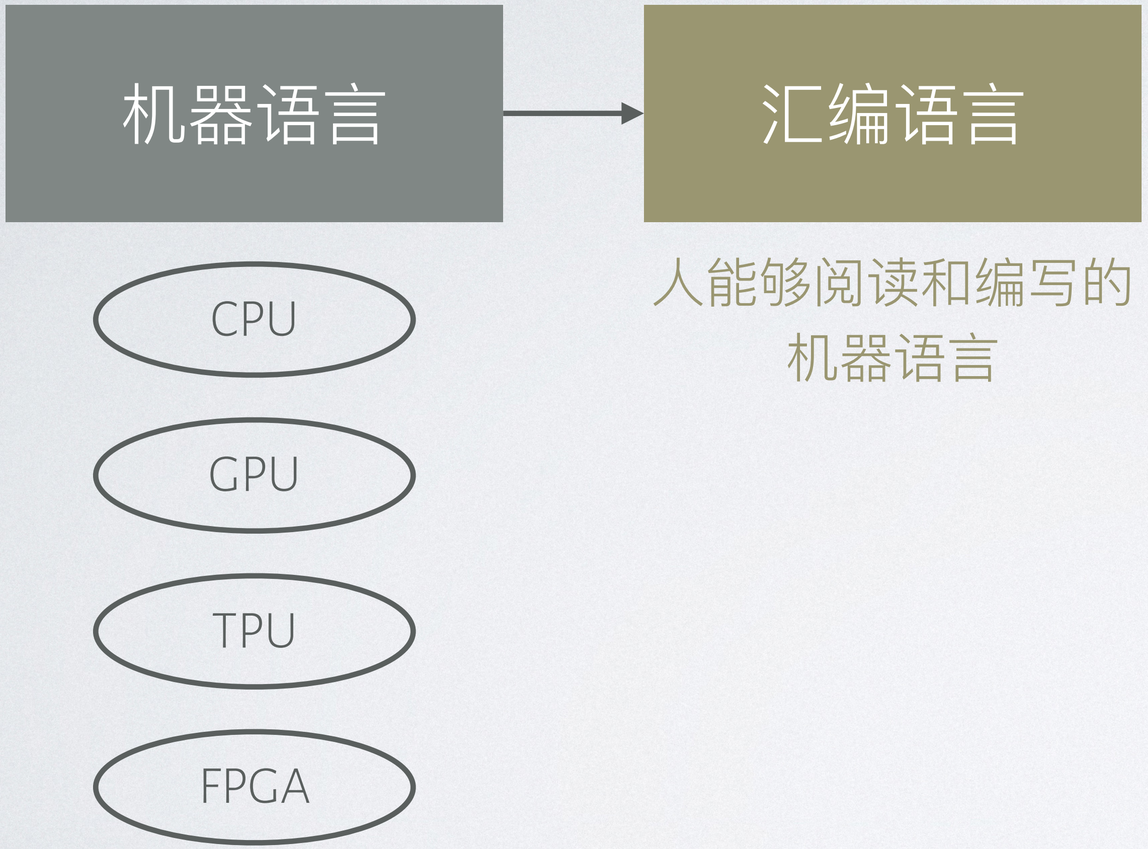
TPU

FPGA

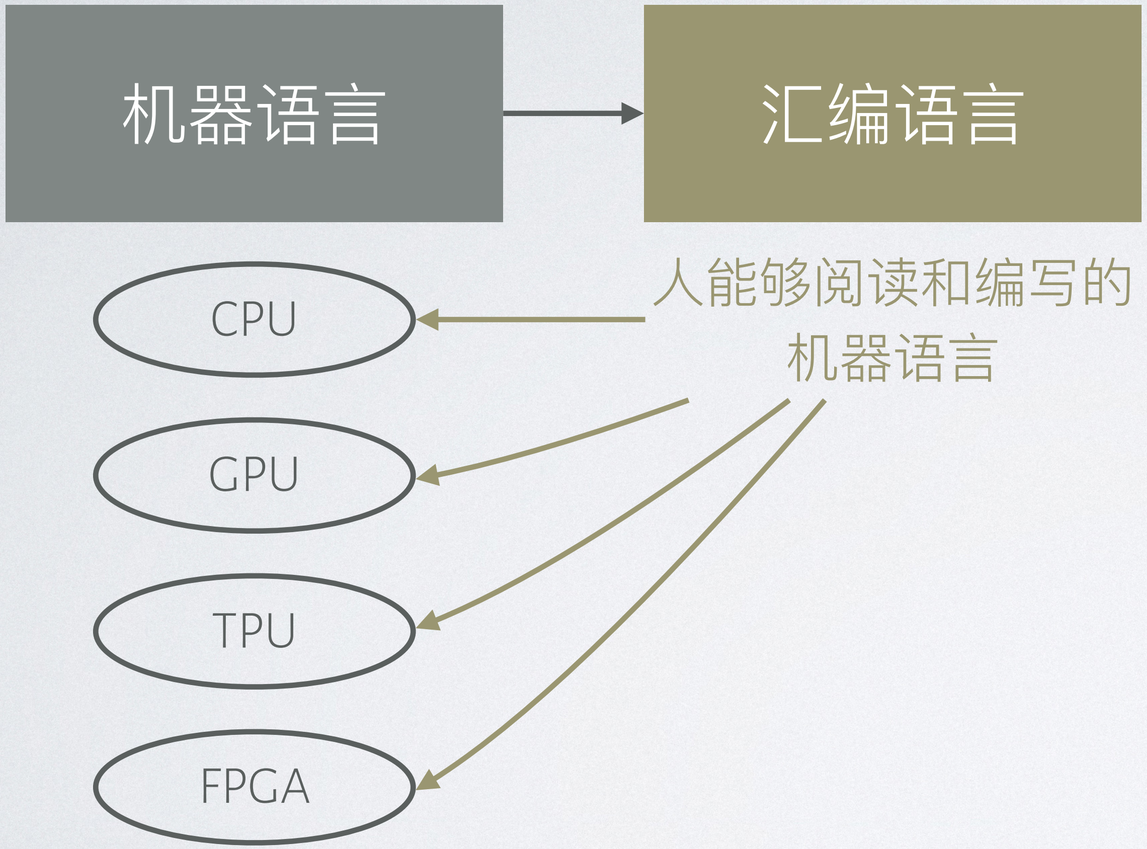
为啥有这么多编程语言?



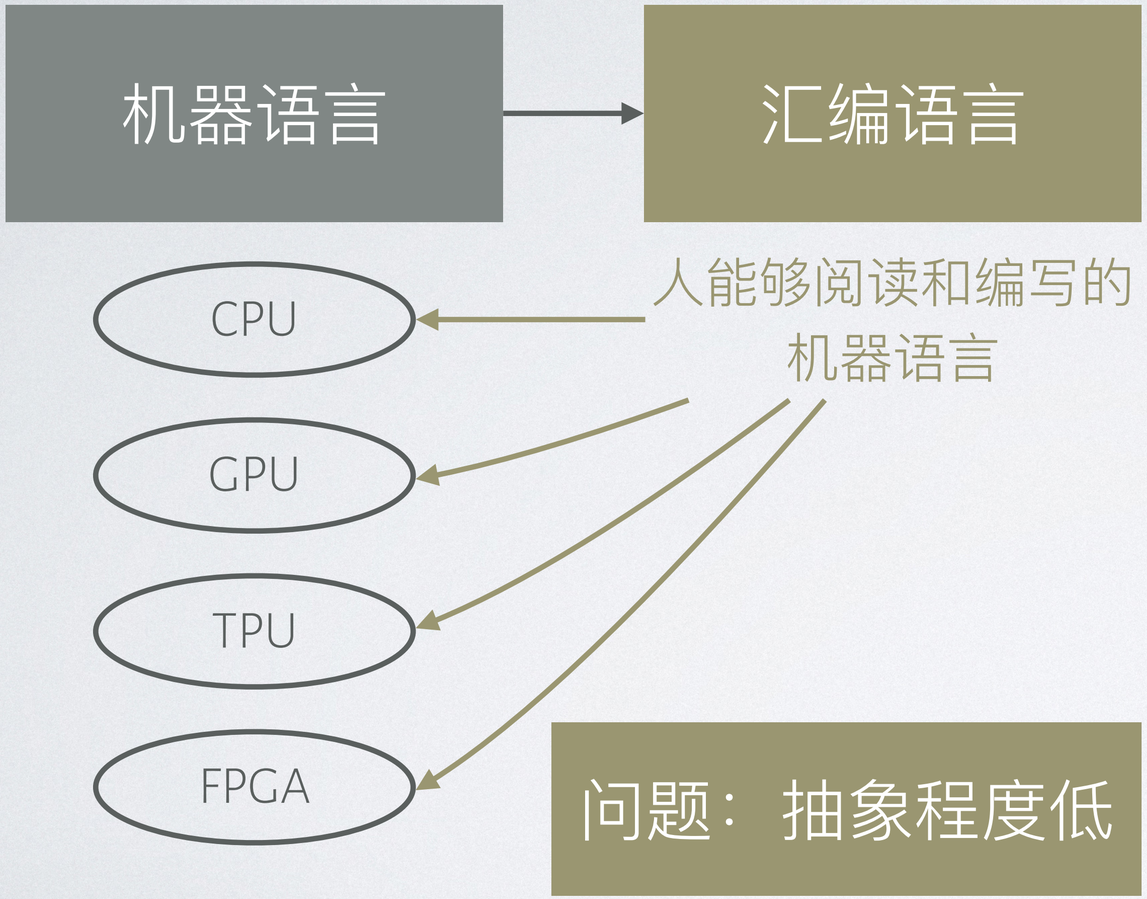
为啥有这么多编程语言?



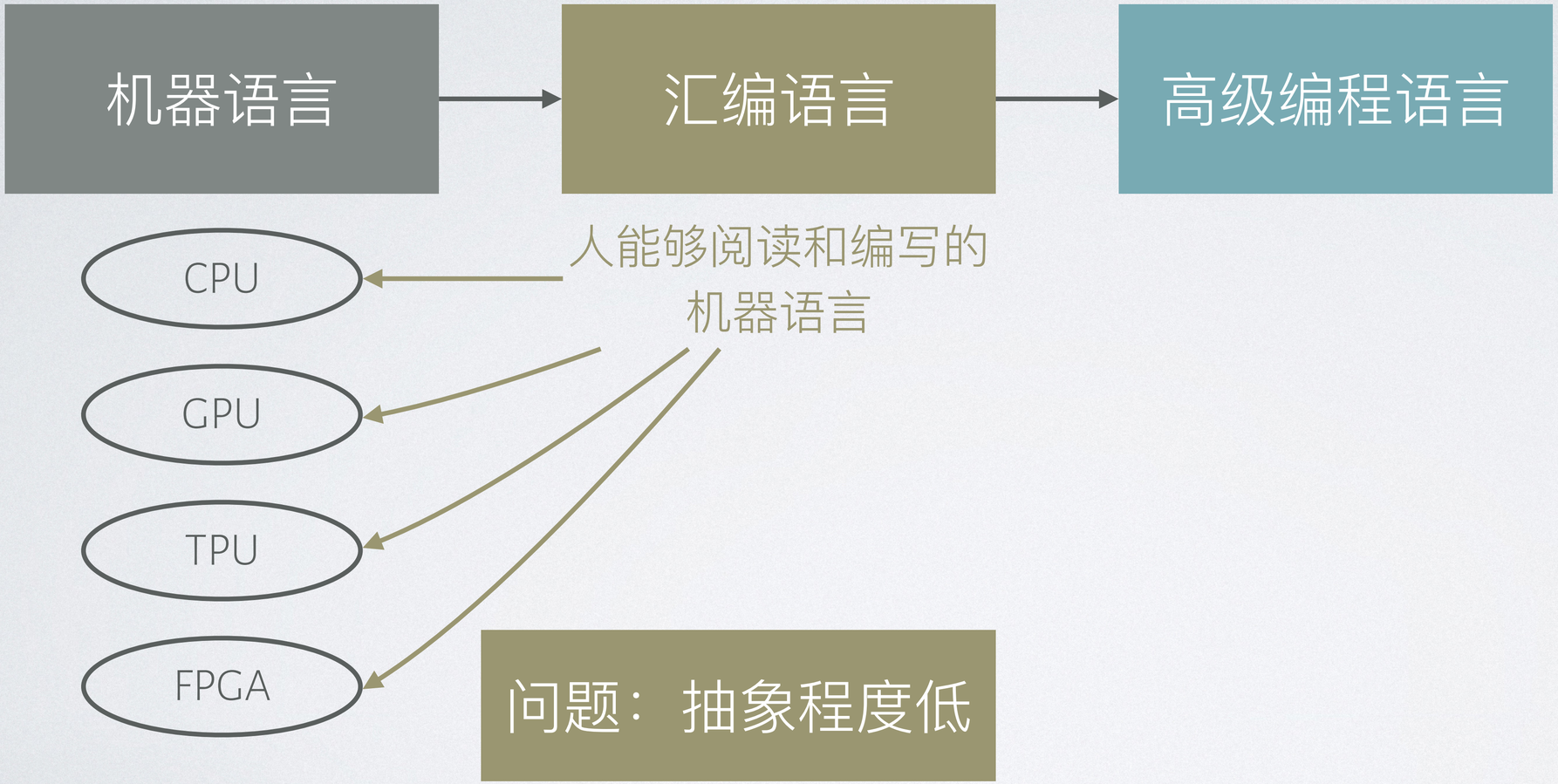
为啥有这么多编程语言?



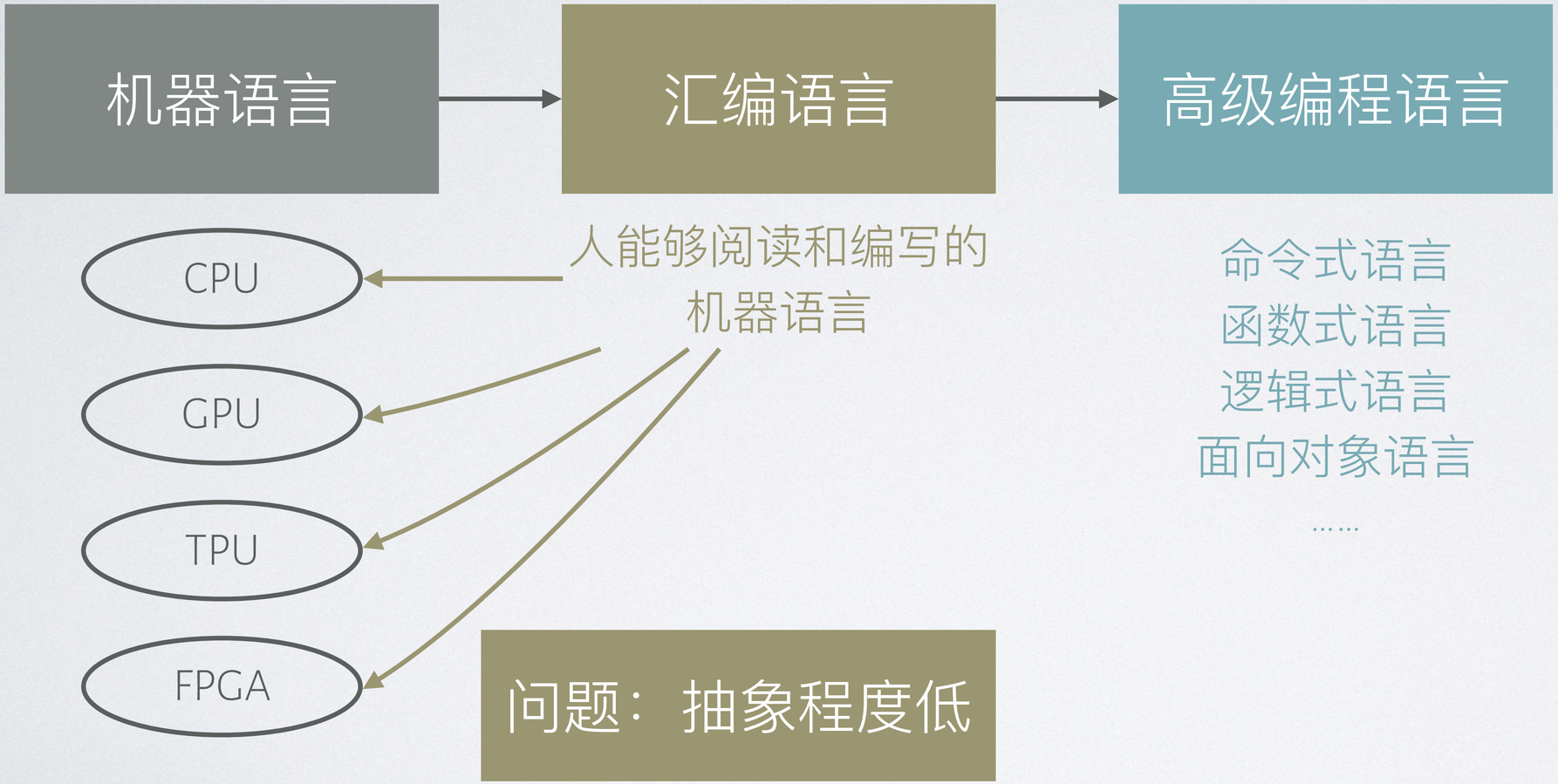
为啥有这么多编程语言?



为啥有这么多编程语言?

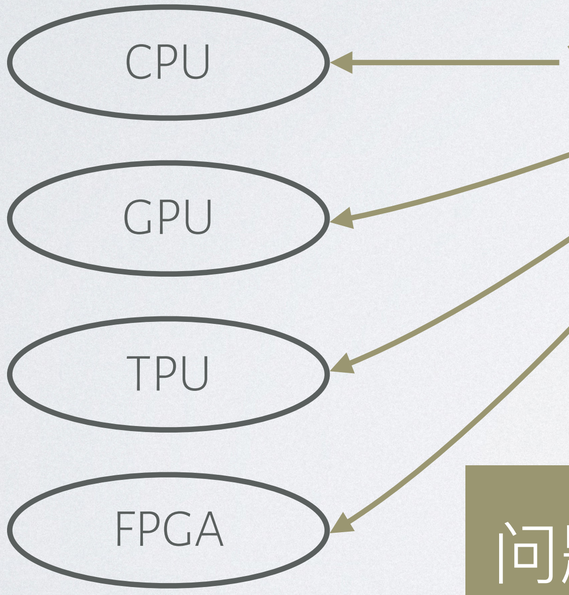


为啥有这么多编程语言?


机器语言
汇编语言
高级编程语言
CPU
GPU
TPU
FPGA
人能够阅读和编写的
机器语言
命令式语言
函数式语言
逻辑式语言
面向对象语言
……
问题：抽象程度低

为啥有这么多编程语言?

机器语言 → 汇编语言 → 高级编程语言



人能够阅读和编写的机器语言

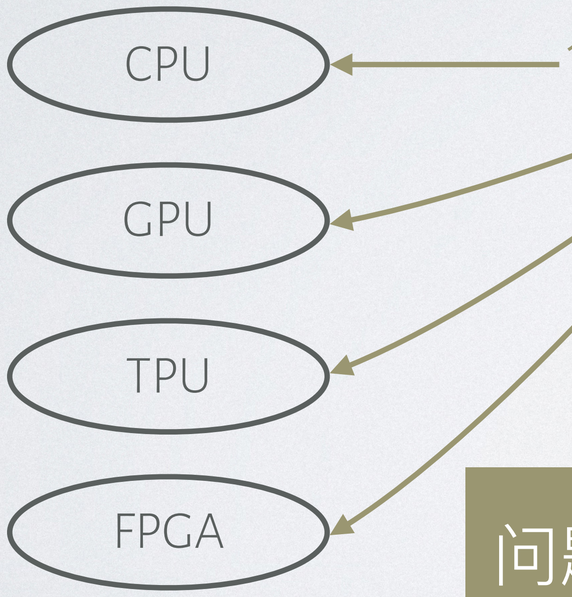
问题：抽象程度低

命令式语言
函数式语言
逻辑式语言
面向对象语言
……

动机：给某一类计算任务设计抽象

为啥有这么多编程语言?

机器语言 → 汇编语言 → 高级编程语言 → 下一代编程语言?



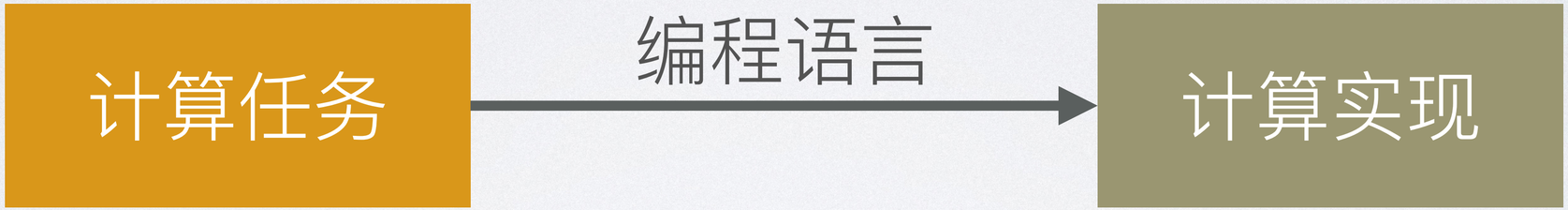
人能够阅读和编写的机器语言

问题：抽象程度低

命令式语言
函数式语言
逻辑式语言
面向对象语言
……

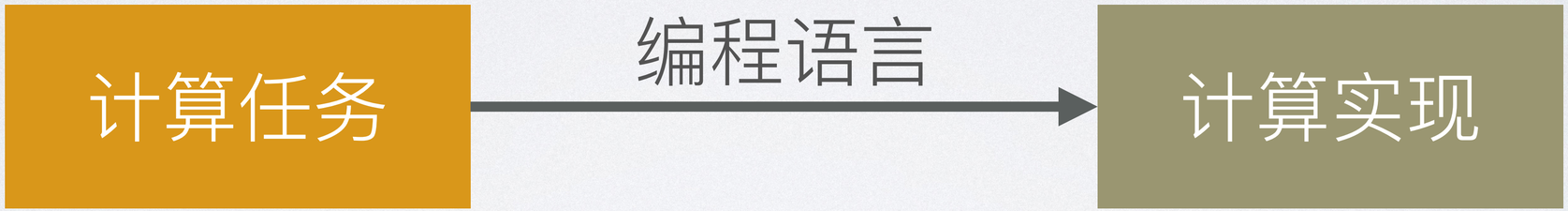
动机：给某一类计算任务设计抽象

研究编程语言的动机



研究编程语言的动机

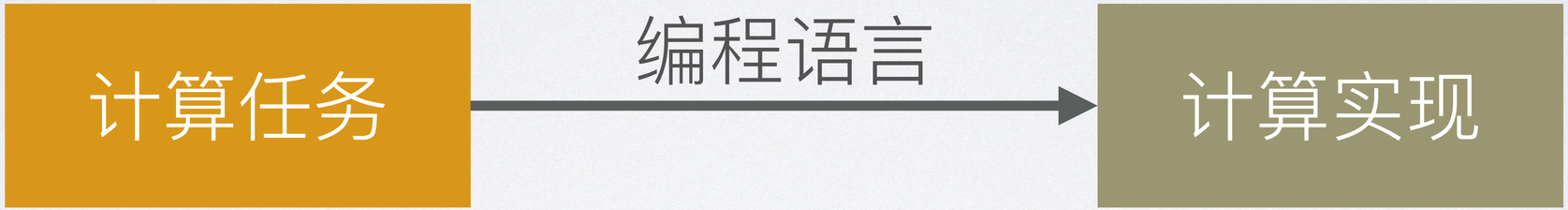
动机一：让程序更容易写
（高效地描述一类计算任务）



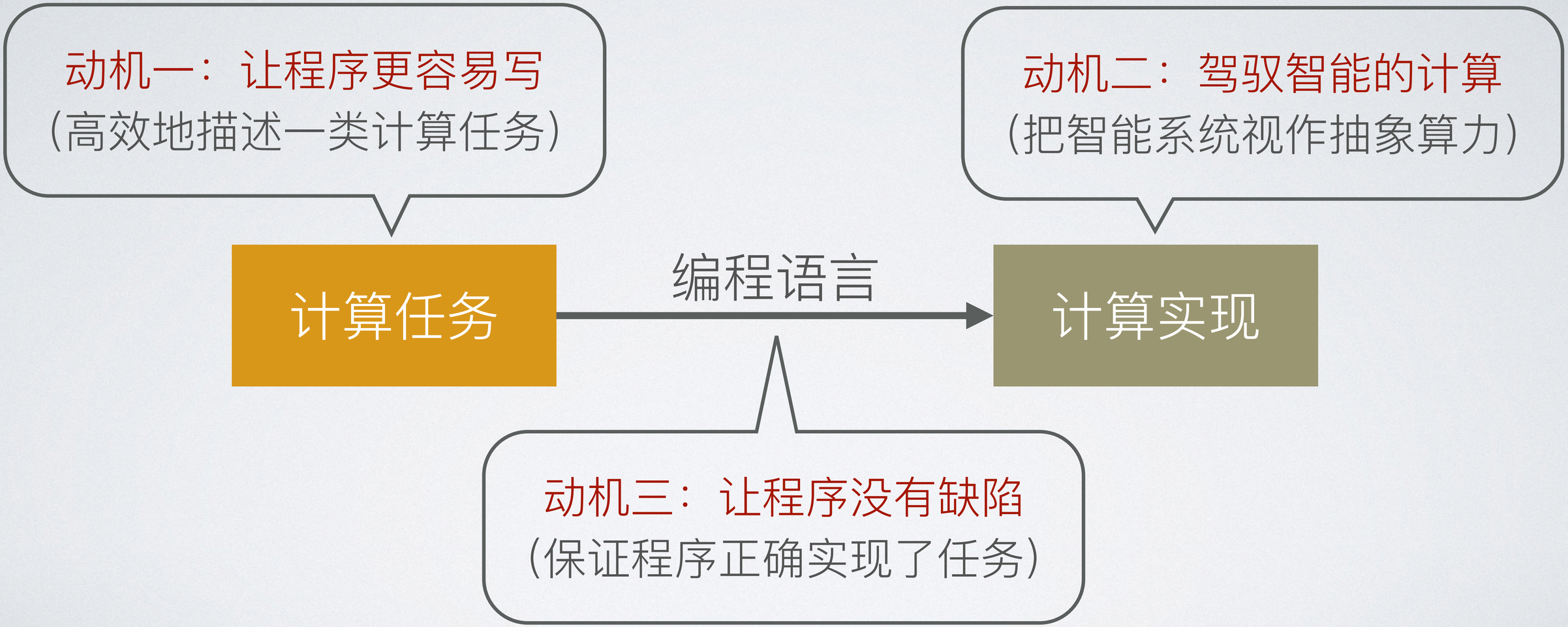
研究编程语言的动机

动机一：让程序更容易写
（高效地描述一类计算任务）

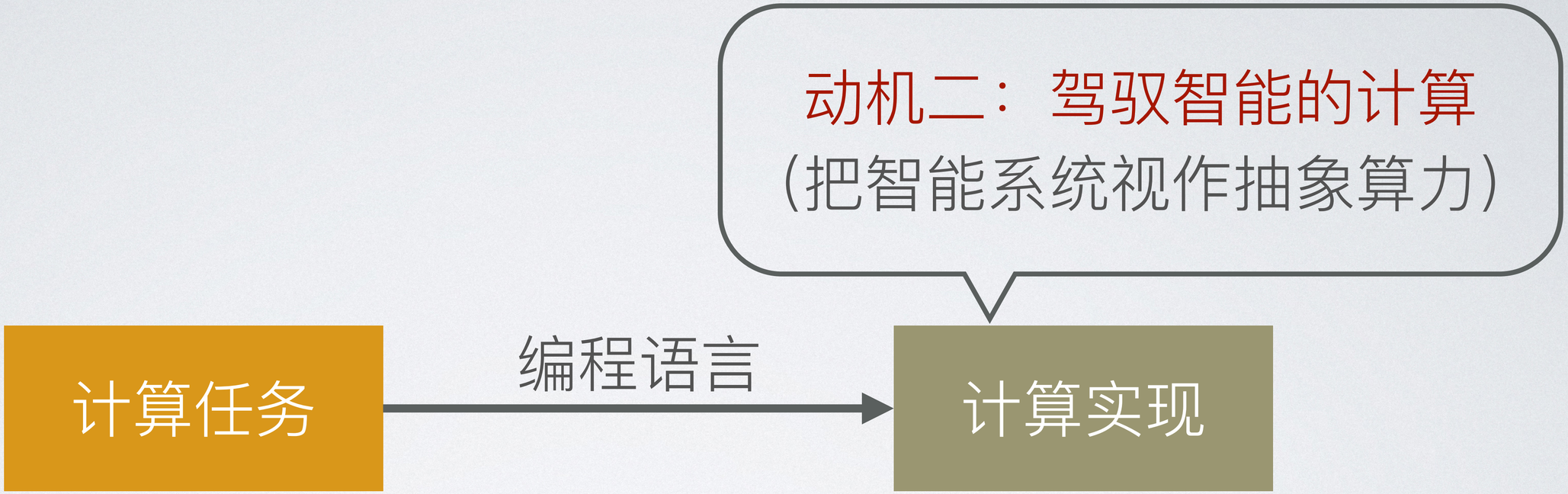
动机二：驾驭智能的计算
（把智能系统视作抽象算力）



研究编程语言的动机


动机一：让程序更容易写
（高效地描述一类计算任务）
动机二：驾驭智能的计算
（把智能系统视作抽象算力）
计算任务
编程语言
计算实现
动机三：让程序没有缺陷
（保证程序正确实现了任务）

研究编程语言的动机



数独求解问题

数独求解问题

- **逻辑式编程**：给描述，算答案

数独求解问题

- **逻辑式编程：**给描述，算答案
- **大语言模型：**给描述，算答案

数独求解问题

- **逻辑式编程：** 给描述，算答案
- **大语言模型：** 给描述，算答案

数独求解问题

- **逻辑式编程：** 给描述，算答案
- **大语言模型：** 给描述，算答案

数独求解问题

- **逻辑式编程：** 给描述，算答案
- **大语言模型：** 给描述，算答案
- 如何改进一下?

数独求解问题

数独求解问题

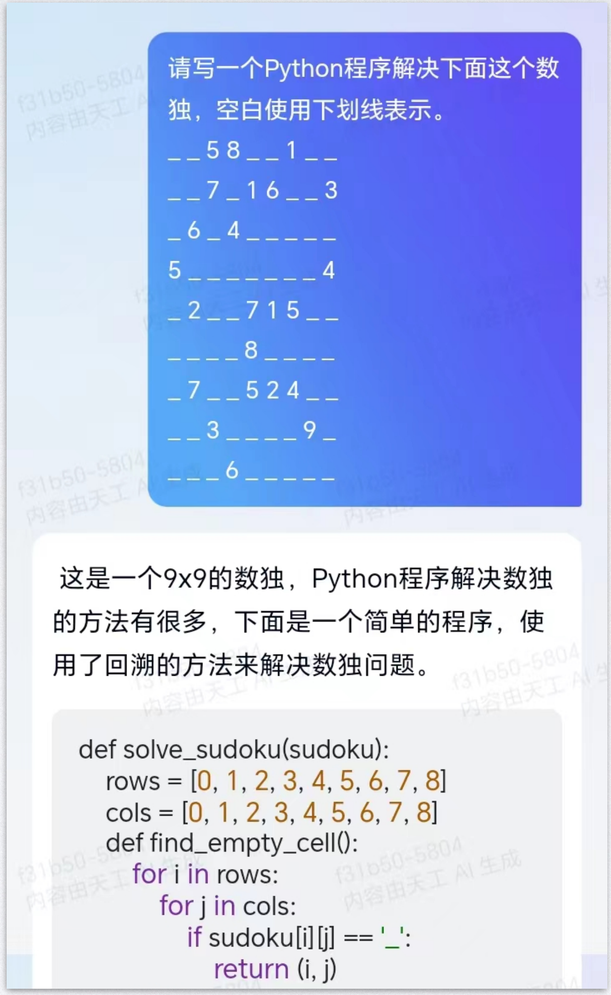
- **程序合成：** 给描述，生成计算答案的程序

数独求解问题

- **程序合成：** 给描述，生成计算答案的程序
- **大语言模型：** 给描述，生成计算答案的程序

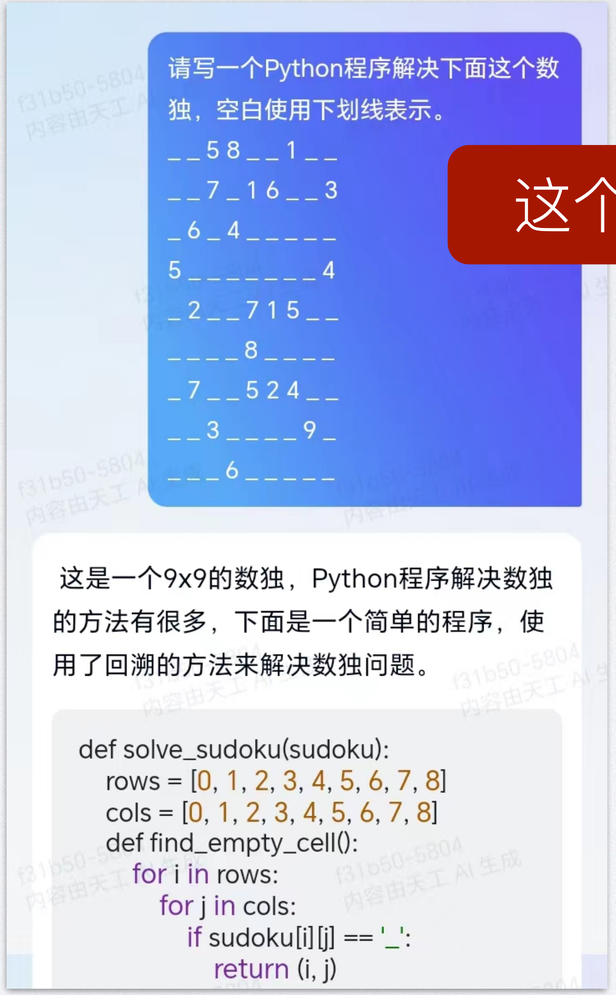
数独求解问题

- **程序合成：** 给描述，生成计算答案的程序
- **大语言模型：** 给描述，生成计算答案的程序



数独求解问题

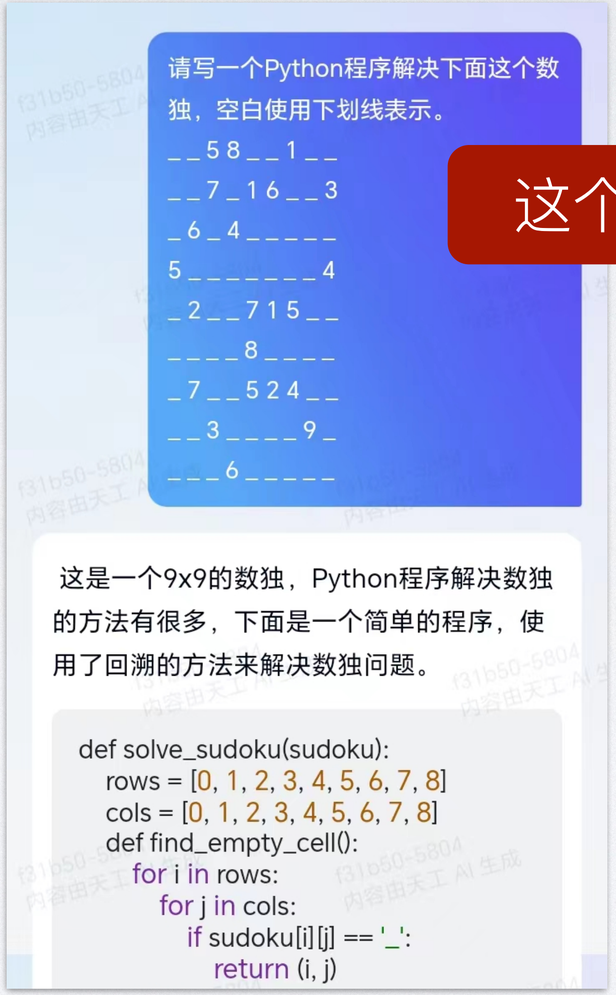
- **程序合成：** 给描述，生成计算答案的程序
- **大语言模型：** 给描述，生成计算答案的程序



这个不对

数独求解问题

- **程序合成：** 给描述，生成计算答案的程序
- **大语言模型：** 给描述，生成计算答案的程序
- 但是程序本身是对的！



这个不对

热点问题：怎么让大语言模型更好地生成程序?

热点问题：怎么让大语言模型更好地生成程序？

~~热点问题：怎么让大语言模型更好地生成程序？~~

为什么用编程语言作为媒介能更好地解决一些问题?

~~热点问题：怎么让大语言模型更好地生成程序？~~

为什么用编程语言作为媒介能更好地解决一些问题?

如果把大语言模型视作抽象算力，它有什么优缺点?

~~热点问题：怎么让大语言模型更好地生成程序？~~

为什么用编程语言作为媒介能更好地解决一些问题？

如果把大语言模型视作抽象算力，它有什么优缺点？

如何为这种智能算力设计新型编程语言和运行时环境？

概率：大语言模型的基石

概率：大语言模型的基石

大语言模型

概率：大语言模型的基石

输入： 提示或上下文 ⟶ 大语言模型

概率：大语言模型的基石

输入：提示或上下文 → 大语言模型 → **输出：**下一个词的概率

概率：大语言模型的基石

输入：提示或上下文 → 大语言模型 → **输出：**下一个词的概率

<句子开始>

概率：大语言模型的基石

输入：提示或上下文 → 大语言模型 → **输出：**下一个词的概率

<句子开始>

0.1：我，0.1：你，0.05：她们，……

概率：大语言模型的基石

输入：提示或上下文 → 大语言模型 → **输出：**下一个词的概率

<句子开始>

<句子开始> **我**

0.1：我，0.1：你，0.05：她们，……

概率：大语言模型的基石

输入：提示或上下文 → 大语言模型 → **输出：**下一个词的概率

<句子开始>

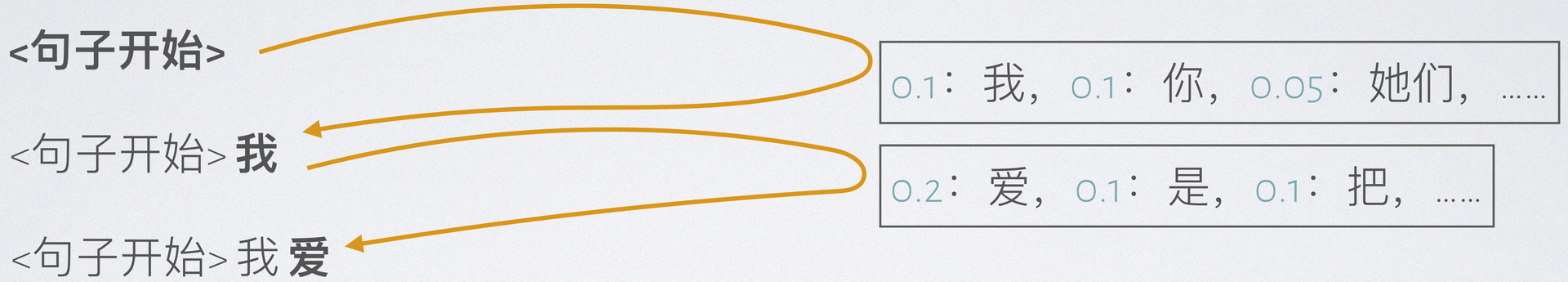
<句子开始> **我**

0.1：我，0.1：你，0.05：她们，……

0.2：爱，0.1：是，0.1：把，……

概率：大语言模型的基石

输入：提示或上下文 → 大语言模型 → **输出：**下一个词的概率

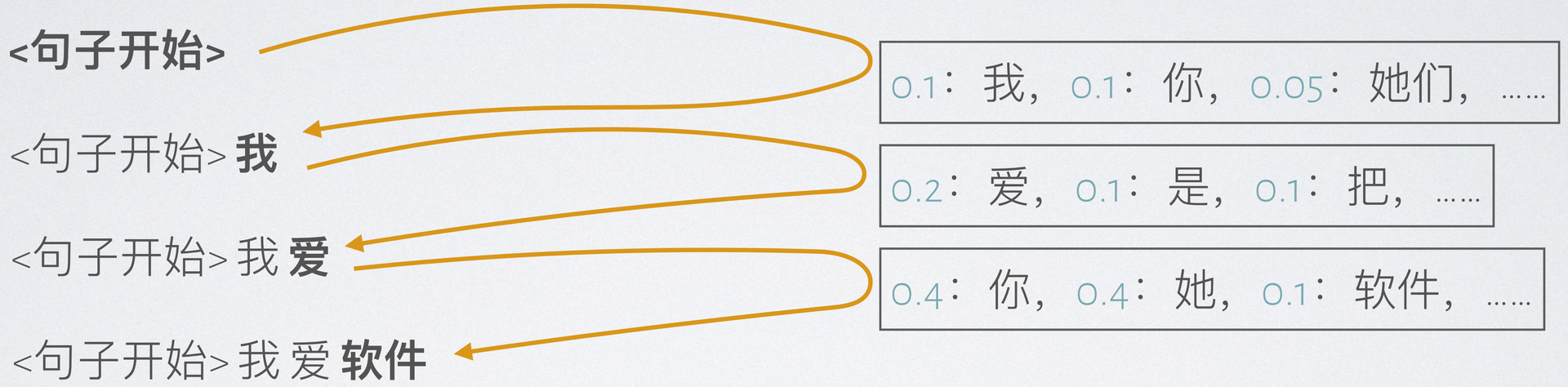


概率：大语言模型的基石

输入：提示或上下文 → 大语言模型 → **输出：**下一个词的概率

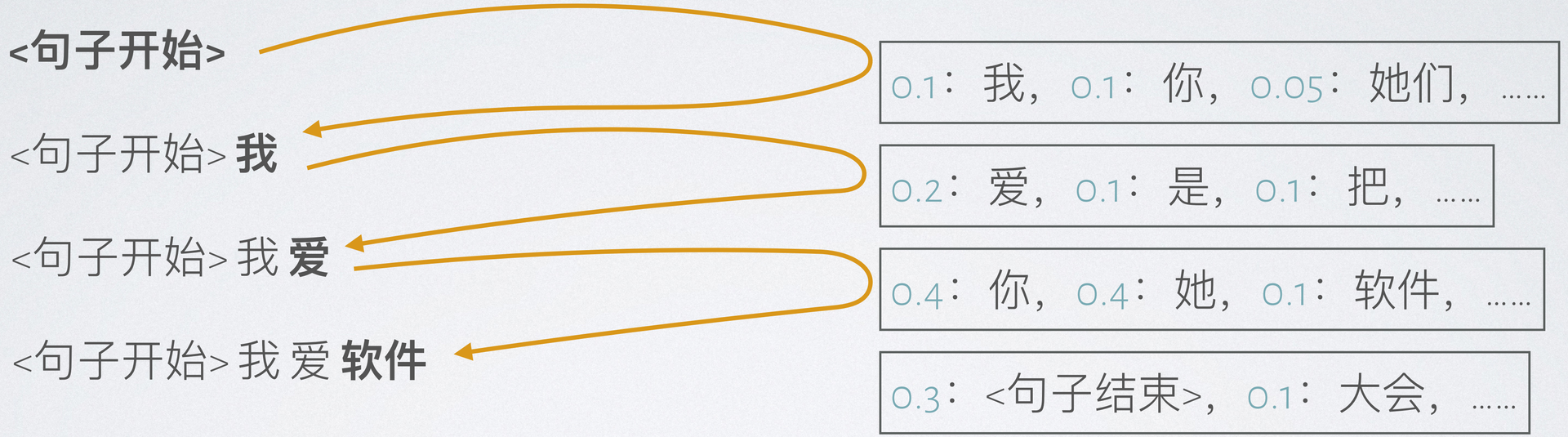
概率：大语言模型的基石

输入：提示或上下文 → 大语言模型 → **输出：**下一个词的概率



概率：大语言模型的基石

输入：提示或上下文 → 大语言模型 → **输出：**下一个词的概率



概率：大语言模型的基石

输入：提示或上下文 → 大语言模型 → **输出：**下一个词的概率

概率：大语言模型的基石

输入：提示或上下文 → 大语言模型 → **输出：**下一个词的概率

数据驱动

从数据中学习概率分布

概率：大语言模型的基石

输入：提示或上下文 → 大语言模型 → **输出：**下一个词的概率

数据驱动
从数据中学习概率分布

不确定性
通过概率来刻画

概率：大语言模型的基石

输入：提示或上下文 → 大语言模型 → **输出：**下一个词的概率

数据驱动
从数据中学习概率分布

不确定性
通过概率来刻画

生成式
从概率分布中采样

SCENIC：驾驶场景描述语言

D. J. Fremont el al. 2019. SCENIC: A Language for Scenario Specification and Scene Generation. In *PLDI'19*.

领域特定语言

SCENIC：驾驶场景描述语言

D. J. Fremont el al. 2019. SCENIC: A Language for Scenario Specification and Scene Generation. In *PLDI'19*.

领域特定语言

SCENIC：驾驶场景描述语言

```
spot = OrientedPoint on visible curb
badAngle = Uniform(1.0, -1.0) *
           Range(10, 20) deg
Car left of spot by 0.5,
facing badAngle relative to roadDirection
```

D. J. Fremont el al. 2019. SCENIC: A Language for Scenario Specification and Scene Generation. In *PLDI'19*.

领域特定语言

SCENIC：驾驶场景描述语言

```
spot = OrientedPoint on visible curb
badAngle = Uniform(1.0, -1.0) *
           Range(10, 20) deg
Car left of spot by 0.5,
facing badAngle relative to roadDirection
```

D. J. Fremont el al. 2019. SCENIC: A Language for Scenario Specification and Scene Generation. In *PLDI'19*.

领域特定语言

SCENIC：驾驶场景描述语言

概率分布

```
spot = OrientedPoint on visible curb
badAngle = Uniform(1.0, -1.0) *
           Range(10, 20) deg
Car left of spot by 0.5,
facing badAngle relative to roadDirection
```

D. J. Fremont el al. 2019. SCENIC: A Language for Scenario Specification and Scene Generation. In *PLDI'19*.

领域特定语言

SCENIC：驾驶场景描述语言

概率分布

```
spot = OrientedPoint on visible curb
badAngle = Uniform(1.0, -1.0) *
           Range(10, 20) deg
Car left of spot by 0.5,
facing badAngle relative to roadDirection
```

描述场景需要满足的性质

D. J. Fremont el al. 2019. SCENIC: A Language for Scenario Specification and Scene Generation. In *PLDI'19*.

领域特定语言

SCENIC：驾驶场景描述语言

概率分布

```
spot = OrientedPoint on visible curb
badAngle = Uniform(1.0, -1.0) *
           Range(10, 20) deg
Car left of spot by 0.5,
facing badAngle relative to roadDirection
```

描述场景需要满足的性质

概率编程：以程序的方式组合不同的概率分布，并对生成的输出进行约束

D. J. Fremont el al. 2019. SCENIC: A Language for Scenario Specification and Scene Generation. In *PLDI'19*.

概率编程：通过程序描述概率模型

概率编程：通过程序描述概率模型

```
ra = resource analysis
pp = probabilistic programming
```

```
prof_like_my_work_on_ra ~ Bernoulli(0.4)
prof_like_my_work_on_pp ~ Bernoulli(0.6)
```

参数

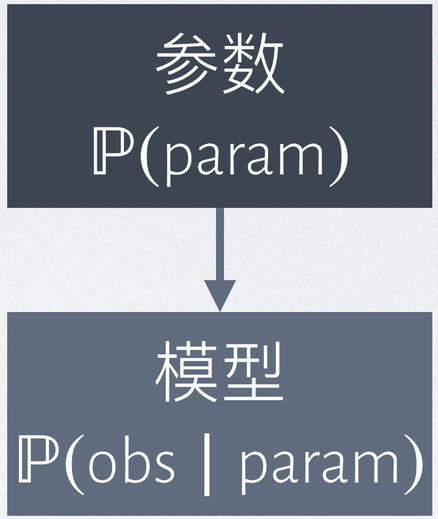
$\mathbb{P}$(param)

概率编程：通过程序描述概率模型

```
ra = resource analysis
pp = probabilistic programming
```

```
prof_like_my_work_on_ra ~ Bernoulli(0.4)
prof_like_my_work_on_pp ~ Bernoulli(0.6)

if (prof like both):
  receive_invitation ~ Bernoulli(0.8)
else if (prof only like pp):
  receive_invitation ~ Bernoulli(0.5)
else:
  …
```



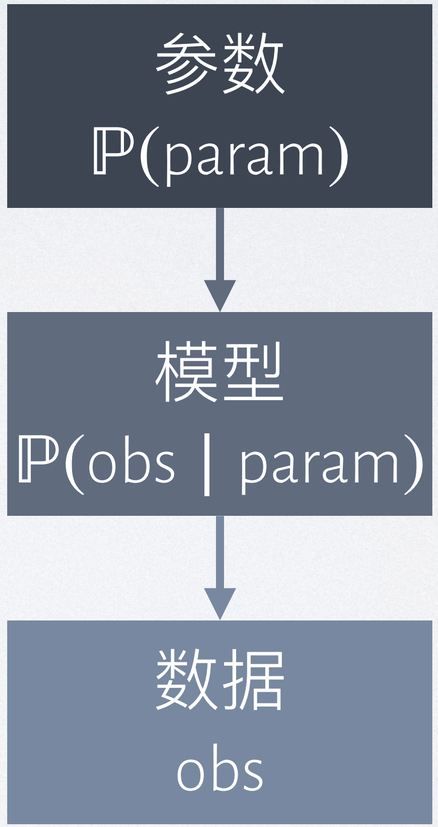
概率编程：通过程序描述概率模型

```
ra = resource analysis
pp = probabilistic programming
```

```
prof_like_my_work_on_ra ~ Bernoulli(0.4)
prof_like_my_work_on_pp ~ Bernoulli(0.6)

if (prof like both):
  receive_invitation ~ Bernoulli(0.8)
else if (prof only like pp):
  receive_invitation ~ Bernoulli(0.5)
else:
  …

observe (receive_invitation == true)
```



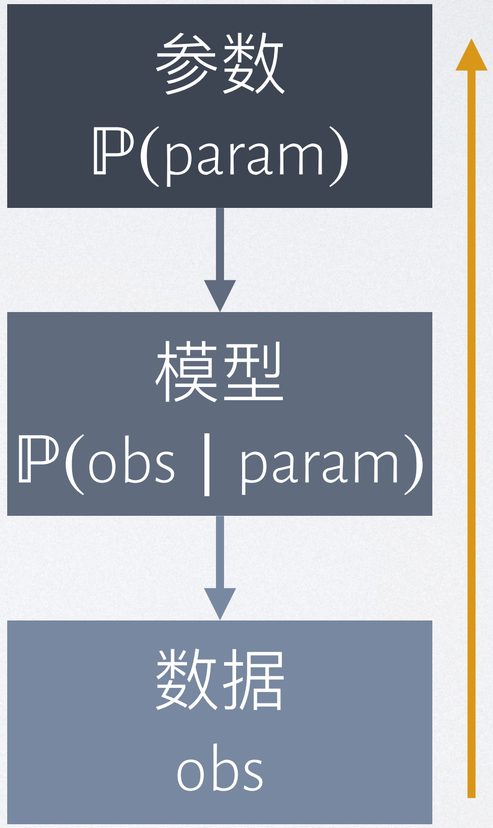
概率编程：通过程序描述概率模型

```
ra = resource analysis
pp = probabilistic programming
```

```
prof_like_my_work_on_ra ~ Bernoulli(0.4)
prof_like_my_work_on_pp ~ Bernoulli(0.6)

if (prof like both):
  receive_invitation ~ Bernoulli(0.8)
else if (prof only like pp):
  receive_invitation ~ Bernoulli(0.5)
else:
  …

observe (receive_invitation == true)
```



贝叶斯推断
ℙ(param | obs)

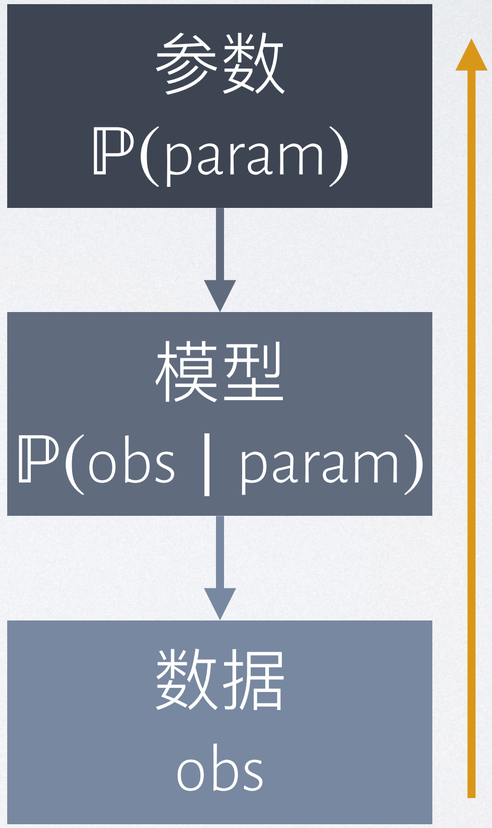
概率编程：通过程序描述概率模型

ra = resource analysis
pp = probabilistic programming

```
prof_like_my_work_on_ra ~ Bernoulli(0.4)
prof_like_my_work_on_pp ~ Bernoulli(0.6)

if (prof like both):
  receive_invitation ~ Bernoulli(0.8)
else if (prof only like pp):
  receive_invitation ~ Bernoulli(0.5)
else:
  …

observe (receive_invitation == true)
```



面试官喜欢我在概率编程上的工作的后验概率是多少?

贝叶斯推断
ℙ(param | obs)

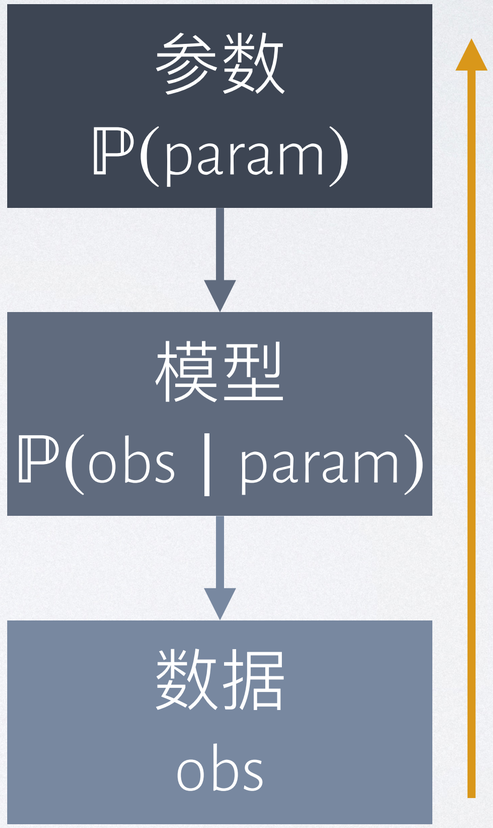
概率编程：通过程序描述概率模型

```
ra = resource analysis
pp = probabilistic programming
```

```
prof_like_my_work_on_ra ~ Bernoulli(0.4)
prof_like_my_work_on_pp ~ Bernoulli(0.6)

if (prof like both):
  receive_invitation ~ Bernoulli(0.8)
else if (prof only like pp):
  receive_invitation ~ Bernoulli(0.5)
else:
  …

observe (receive_invitation == true)
```

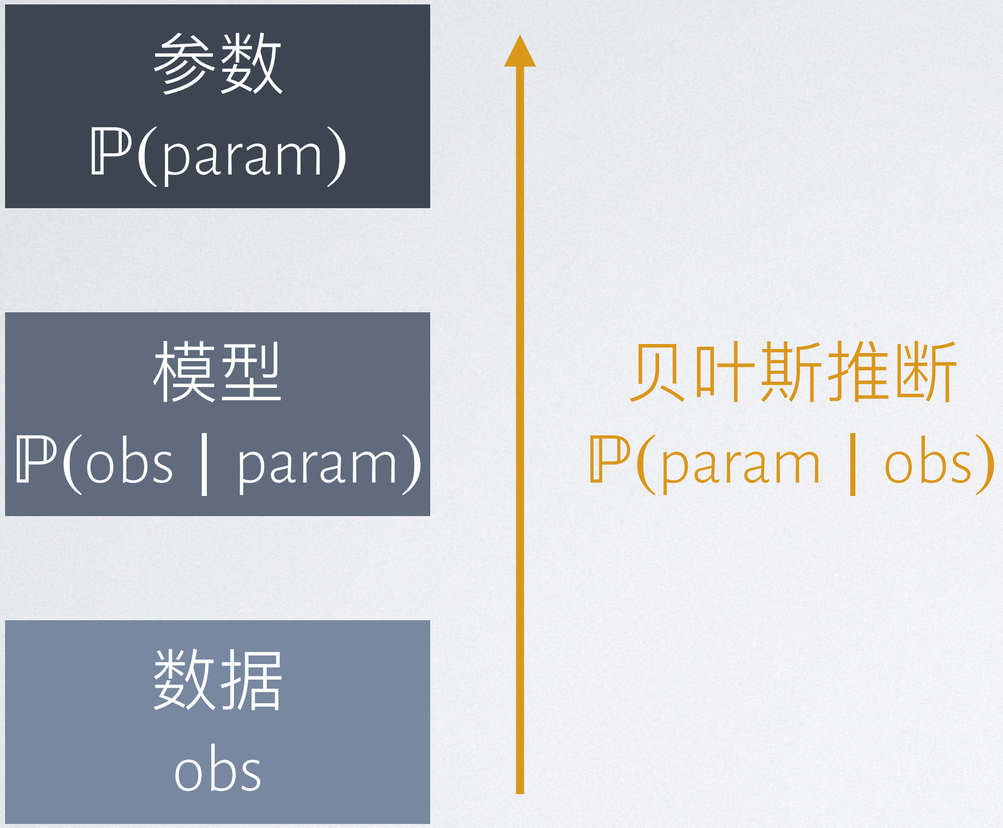


面试官喜欢我在概率编程上的工作的后验概率是多少?

贝叶斯推断
ℙ(param | obs)

一个困难的问题

可编程概率推断



可编程概率推断

参数
$\mathbb{P}$(param)

模型
$\mathbb{P}$(obs | param)

数据
obs

贝叶斯推断
$\mathbb{P}$(param | obs)

用户提供的引导程序
$\mathbb{P}_{guide}$(param)

可编程概率推断

参数
$\mathbb{P}$(param)

模型
$\mathbb{P}$(obs | param)

数据
obs

贝叶斯推断
$\mathbb{P}$(param | obs)

用户提供的引导程序
$\mathbb{P}_{guide}$(param)

优势：提供了对具体模型针对性调优的灵活性

可编程概率推断

参数
$\mathbb{P}$(param)

模型
$\mathbb{P}$(obs | param)

数据
obs

贝叶斯推断
$\mathbb{P}$(param | obs)

用户提供的引导程序
$\mathbb{P}_{guide}$(param)

优势：提供了对具体模型针对性调优的灵活性

劣势：用户需要确保模型-引导的一致性

可编程概率推断

参数
$\mathbb{P}$(param)

模型
$\mathbb{P}$(obs | param)

数据
obs

贝叶斯推断
$\mathbb{P}$(param | obs)

用户提供的引导程序
$\mathbb{P}_{guide}$(param)

优势：提供了对具体模型针对性调优的灵活性

劣势：用户需要确保模型-引导的一致性

一个复杂的任务

Pyro：

4. Make sure your model and guide distributions have the same support

基于协程的模型-引导编程

D. Wang, J. Hoffmann, and T. Reps. Sound Probabilistic Inference via Guide Types. In *PLDI'21*.

L. Pham, **D. Wang**, F. Saad , and J. Hoffmann. Probabilistic Inference with Soundly Composed Guide Programs. In *OOPSLA'24*.

模型

引导

核心贡献：首个使用并发编程技术来确保可编程贝叶斯推断中的模型-引导一致性

基于协程的模型-引导编程

D. Wang, J. Hoffmann, and T. Reps. Sound Probabilistic Inference via Guide Types. In *PLDI'21*.

L. Pham, **D. Wang**, F. Saad , and J. Hoffmann. Probabilistic Inference with Soundly Composed Guide Programs. In *OOPSLA'24*.

模型

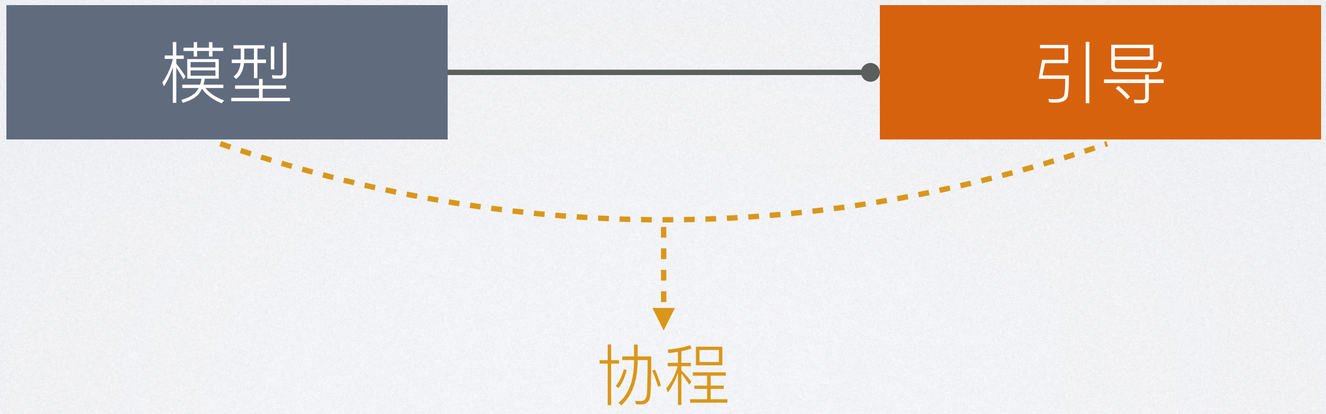
引导

核心贡献：首个使用并发编程技术来确保可编程贝叶斯推断中的模型-引导一致性

基于协程的模型-引导编程

D. Wang, J. Hoffmann, and T. Reps. Sound Probabilistic Inference via Guide Types. In *PLDI'21*.

L. Pham, **D. Wang**, F. Saad , and J. Hoffmann. Probabilistic Inference with Soundly Composed Guide Programs. In *OOPSLA'24*.

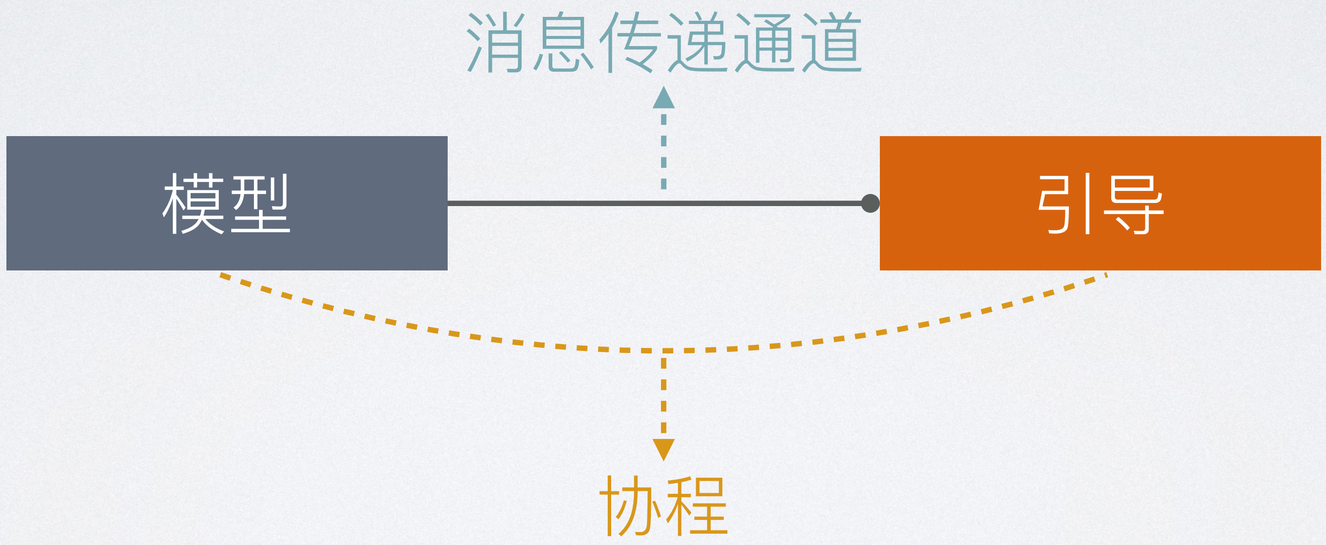


核心贡献：首个使用并发编程技术来确保可编程贝叶斯推断中的模型-引导一致性

基于协程的模型-引导编程

D. Wang, J. Hoffmann, and T. Reps. Sound Probabilistic Inference via Guide Types. In *PLDI'21*.

L. Pham, **D. Wang**, F. Saad , and J. Hoffmann. Probabilistic Inference with Soundly Composed Guide Programs. In *OOPSLA'24*.

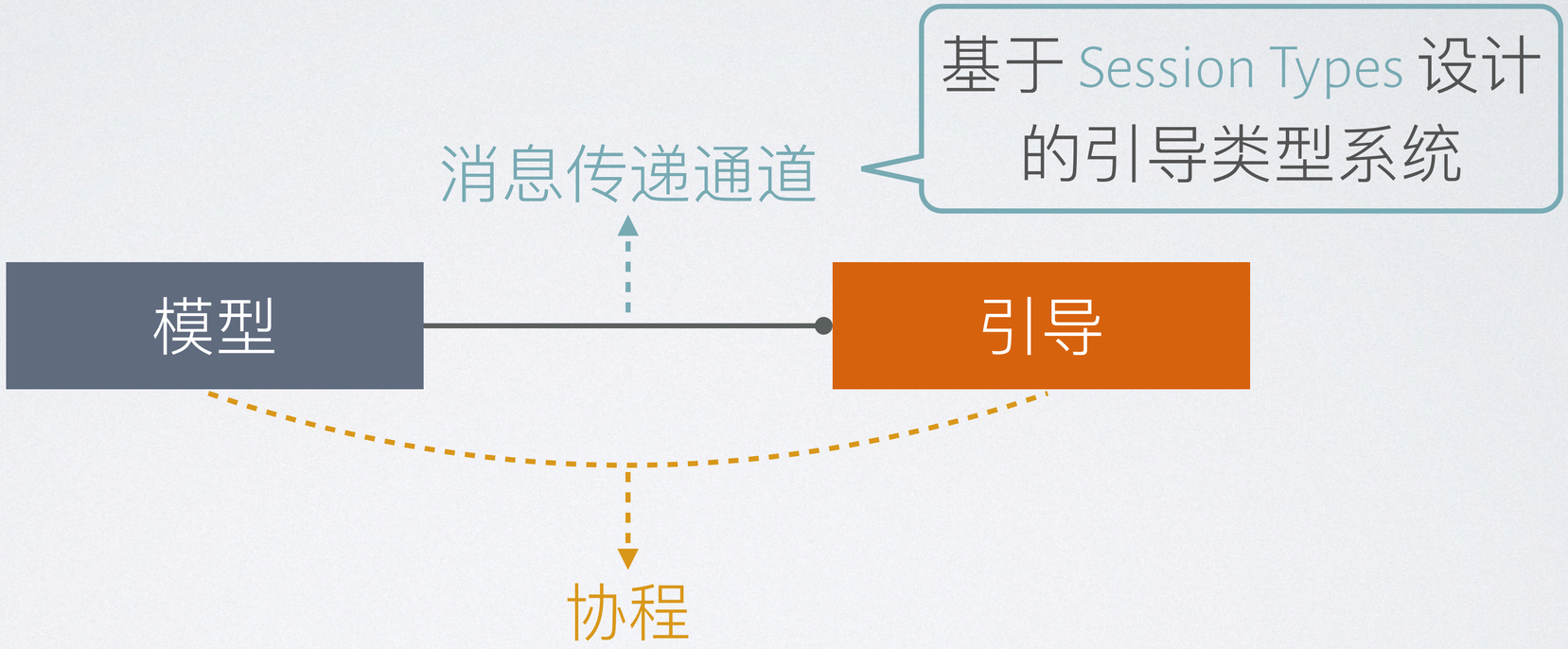


核心贡献：首个使用并发编程技术来确保可编程贝叶斯推断中的模型-引导一致性

基于协程的模型-引导编程

D. Wang, J. Hoffmann, and T. Reps. Sound Probabilistic Inference via Guide Types. In *PLDI'21*.

L. Pham, **D. Wang**, F. Saad , and J. Hoffmann. Probabilistic Inference with Soundly Composed Guide Programs. In *OOPSLA'24*.



核心贡献：首个使用并发编程技术来确保可编程贝叶斯推断中的模型-引导一致性

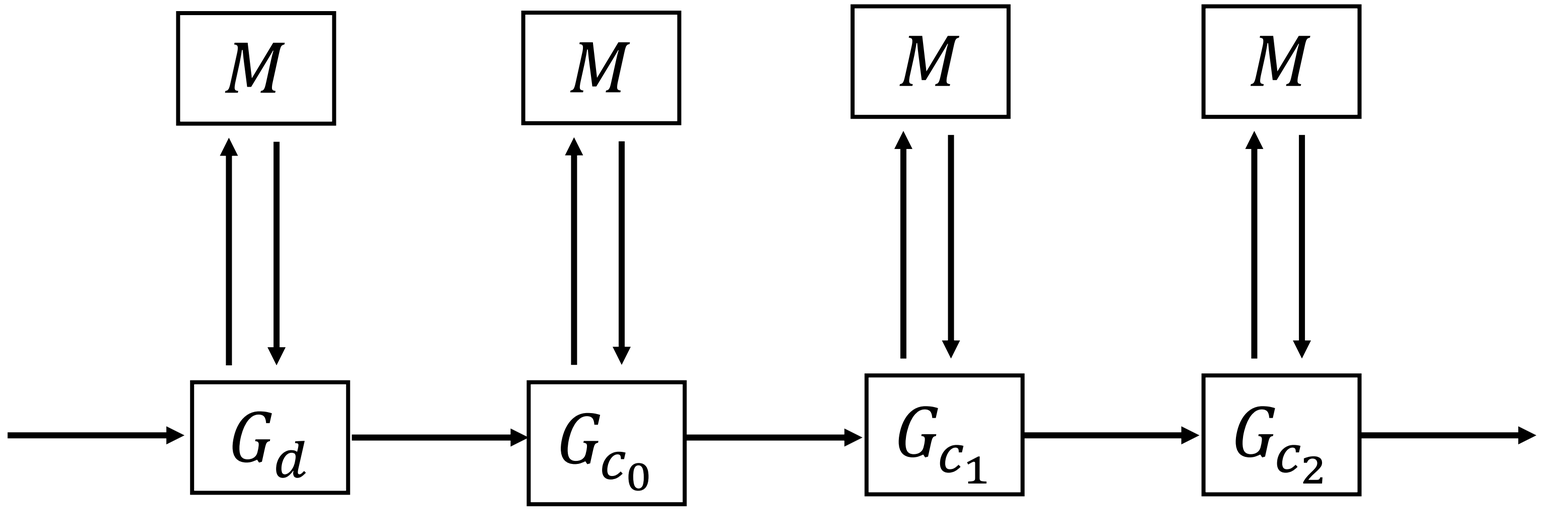
保证引导程序组合正确性的可编程 MCMC

针对 Multiple-Block Metropolis-Hastings（BMH）推断算法

提供语言支持

Contribution 1: Formulation of BMH

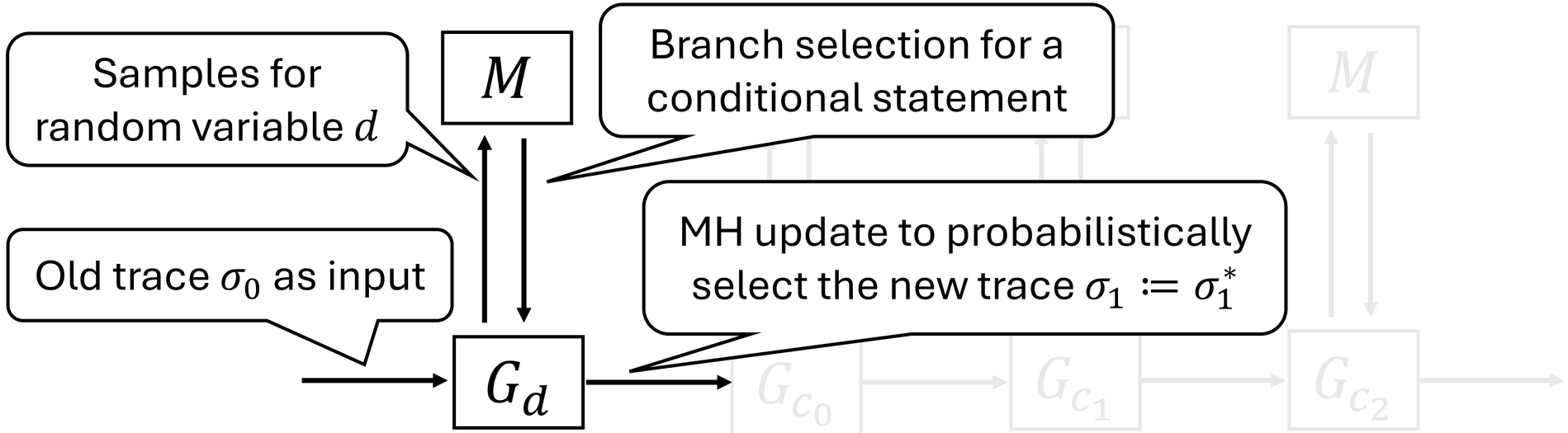
BMH is a sequential composition of guide programs



来自合作者 Long Pham 的 OOPSLA 报告。

Contribution 1: Formulation of BMH

BMH is a sequential composition of guide program



The communication protocol is described by a guide type:

$$\underbrace{\mathbb{N}_3}_{\text{Distribution type of } d} \wedge \mathbb{R} \wedge \underbrace{\&}_{\text{Branch selection}} \begin{cases} 1, & \text{Termination} \\ \mathbb{R} \wedge \& \begin{cases} 1, \\ \mathbb{R} \wedge 1 \end{cases} \end{cases}$$

来自合作者 Long Pham 的 OOPSLA 报告。

Conclusion

1. Formulated Multiple-Block Metropolis-Hastings (BMH) in guide-based programmable inference
2. Proved polynomial-time decidability of structural guide-type equality
3. Developed a coverage-checking algorithm for verifying that every random variable is freshly sampled at least once

来自合作者 Long Pham 的 OOPSLA 报告。

让人工智能来做引导?

- 回顾「驾驶场景生成」问题：典型的人工智能生成内容的应用

让人工智能来做引导?

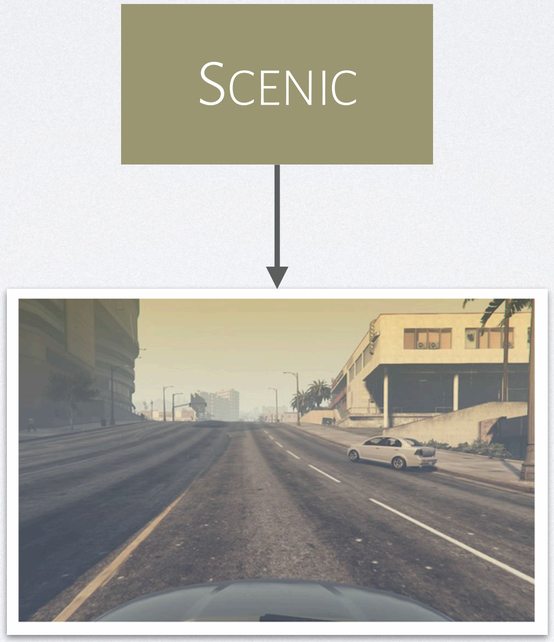
- 回顾「驾驶场景生成」问题：典型的人工智能生成内容的应用

“A scene of a badly-parked car”

让人工智能来做引导?

- 回顾「驾驶场景生成」问题：典型的人工智能生成内容的应用

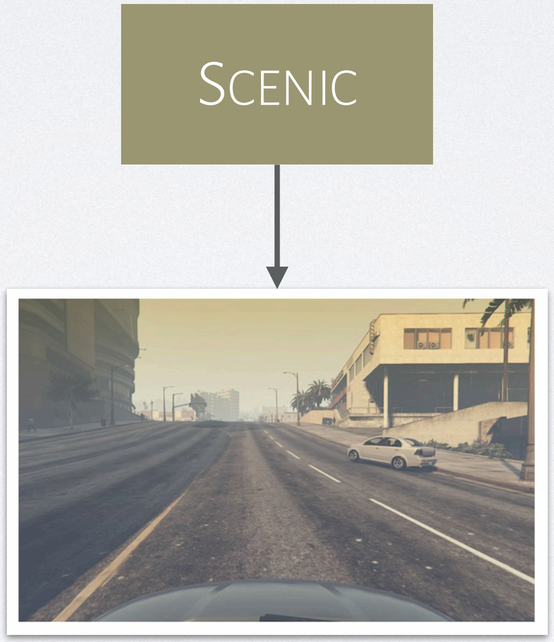
“A scene of a badly-parked car”



让人工智能来做引导?

- 回顾「驾驶场景生成」问题：典型的人工智能生成内容的应用

“A scene of a badly-parked car”



- 人工智能的优势：内容丰富、擅长处理模糊性

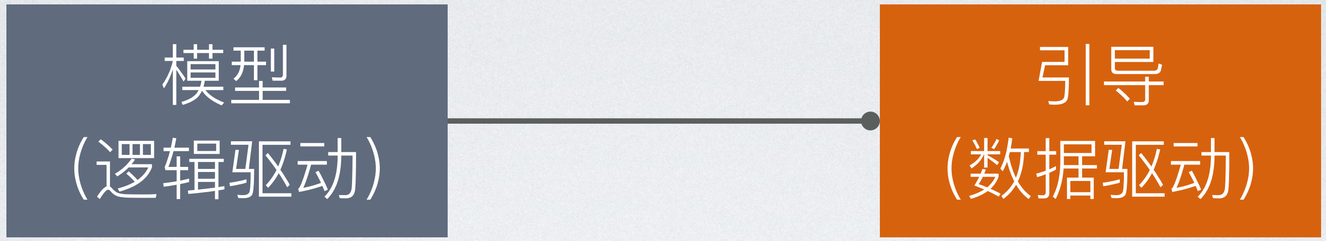
让人工智能来做引导?

- 回顾「驾驶场景生成」问题：典型的人工智能生成内容的应用

"A scene of a badly-parked car"

- 人工智能的优势：内容丰富、擅长处理模糊性
- 概率编程的优势：可解释性高、擅长表达逻辑

结合自然语言进行编程是否有意义?



结合自然语言进行编程是否有意义?

模型
（逻辑驱动）

引导
（数据驱动）

智能算力（如大语言模型）提供采样能力

结合自然语言进行编程是否有意义?

模型
（逻辑驱动）

引导
（数据驱动）

智能算力（如大语言模型）提供采样能力

```
spot = OrientedPoint on visible curb
badAngle = Uniform(1.0, -1.0) *
           Range(10, 20) deg
Car left of spot by 0.5,
facing badAngle relative to roadDirection
```

+

“A scene of a badly-parked car”

结合自然语言进行编程是否有意义?

模型
（逻辑驱动）

引导
（数据驱动）

智能算力（如大语言模型）提供采样能力

```
spot = OrientedPoint on visible curb
badAngle = Uniform(1.0, -1.0) *
           Range(10, 20) deg
Car left of spot by 0.5,
facing badAngle relative to roadDirection
```

+

“A scene of a badly-parked car”

```
var scene = empty();
while (!scene.check_condition("可以看到右侧的马路沿")) {
    scene = generate("车辆在马路上行驶时前置摄像场景");
}
var car = generate("一辆普通的小轿车");
scene.do_action("${car}斜着停在了路沿上");
return scene.render();
```

结合自然语言进行编程是否有意义?

模型
(逻辑驱动)

引导
(数据驱动)

智能算力（如大语言模型）提供采样能力

```
spot = OrientedPoint on visible curb
badAngle = Uniform(1.0, -1.0) *
           Range(10, 20) deg
Car left of spot by 0.5,
facing badAngle relative to roadDirection
```

+

“A scene of a badly-parked car”

```
var scene = empty();
while (!scene.check_condition("可以看到右侧的马路沿")) {
    scene = generate("车辆在马路上行驶时前置摄像场景");
}
var car = generate("一辆普通的小轿车");
scene.do_action("${car}斜着停在了路沿上");
return scene.render();
```

编程语言研究选题

这种程序的**语义**如何描述?

这种程序要怎么进行**编译**?

这种程序**运行**要什么环境?

在这停顿：研究编程语言的动机