

人工智能系统 System for AI

自动机器学习系统 AutoML systems

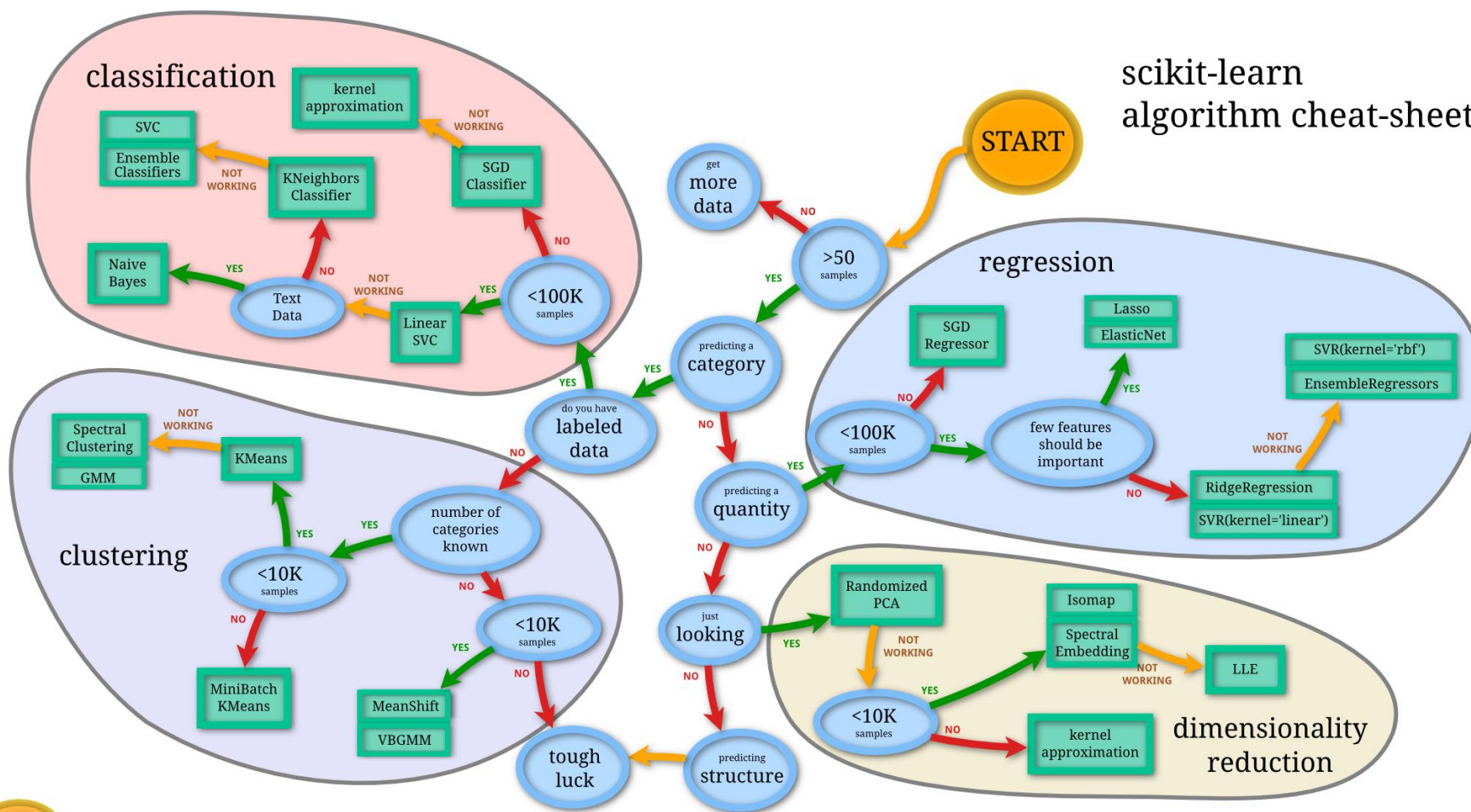
主要内容

- 概述与原理
- 主要算法介绍
- 应用
- 自动机器学习系统
- 现状

机器学习建模挑战

- 算法繁多、新算法层出不穷
- 模型调参工作复杂、难寻规律
- 计算资源与人工分析交替成为瓶颈

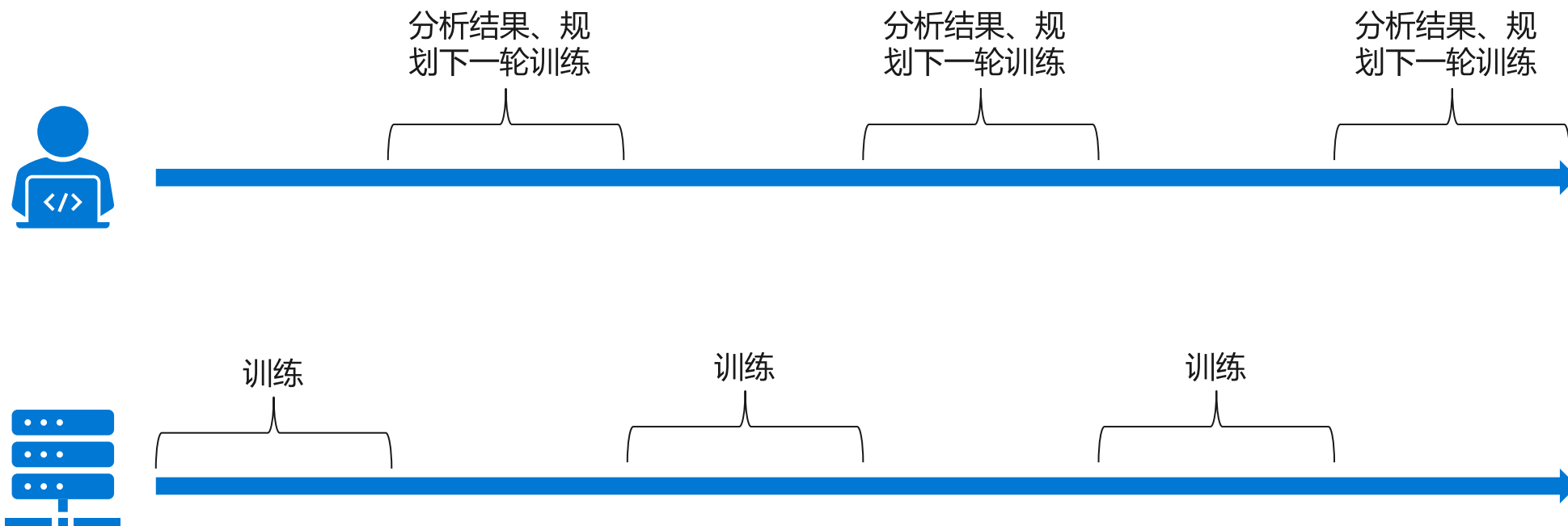
挑战 - 算法繁多



挑战 - 超参复杂

参数	类型	RandomForestClassifier	RandomForestRegressor	GradientBoostingClassifier	GradientBoostingRegressor
loss	目标			损失函数 • exponential: 模型等同AdaBoost ★ deviance: 和Logistic Regression的损失函数一致	损失函数 • exponential: 模型等同AdaBoost ★ deviance: 和Logistic Regression的损失函数一致
alpha	目标			损失函数为huber或quantile的时, alpha为损失函数中的参数	损失函数为huber或quantile的时, alpha为损失函数中的参数
class_weight	目标	类别的权值			
n_estimators	性能	子模型的数量 • int: 个数 ★ 10: 默认值	子模型的数量 • int: 个数 ★ 10: 默认值	子模型的数量 • int: 个数 ★ 100: 默认值	子模型的数量 • int: 个数 ★ 100: 默认值
learning_rate	性能			学习率 (缩减)	学习率 (缩减)
criterion	性能	判断节点是否继续分裂采用的计算方法 • entropy ★ gini	判断节点是否继续分裂采用的计算方法 ★ mse		
max_features	性能	节点分裂时参与判断的最大特征数 • int: 个数 • float: 占有所有特征的百分比 ★ auto: 所有特征数的开方 • sqrt: 所有特征数的开方 • log2: 所有特征数的log2值 • None: 等于所有特征数	节点分裂时参与判断的最大特征数 • int: 个数 • float: 占有所有特征的百分比 ★ auto: 所有特征数的开方 • sqrt: 所有特征数的开方 • log2: 所有特征数的log2值 • None: 等于所有特征数	节点分裂时参与判断的最大特征数 • int: 个数 • float: 占有所有特征的百分比 • auto: 所有特征数的开方 • sqrt: 所有特征数的开方 • log2: 所有特征数的log2值 ★ None: 等于所有特征数	节点分裂时参与判断的最大特征数 • int: 个数 • float: 占有所有特征的百分比 • auto: 所有特征数的开方 • sqrt: 所有特征数的开方 • log2: 所有特征数的log2值 ★ None: 等于所有特征数
subsample	性能			子采样率 • float: 采样率 ★ 1.0: 默认值	子采样率 • float: 采样率 ★ 1.0: 默认值
init	性能			初始子模型	初始子模型
n_jobs	效率	并行数 • int: 个数 • -1: 跟CPU核数一致 ★ 1:默认值	并行数 • int: 个数 • -1: 跟CPU核数一致 ★ 1:默认值		
warm_start	效率	是否热启动, 如果是, 则下一次训练是以追加树的形式进行 • bool: 热启动 ★ False: 默认值	是否热启动, 如果是, 则下一次训练是以追加树的形式进行 • bool: 热启动 ★ False: 默认值	是否热启动, 如果是, 则下一次训练是以追加树的形式进行 • bool: 热启动 ★ False: 默认值	是否热启动, 如果是, 则下一次训练是以追加树的形式进行 • bool: 热启动 ★ False: 默认值
presort	效率			是否预排序,预排序可以加速查找最佳分裂点, 对于稀疏数据不管用 • Bool ★ auto: 非稀疏数据则预排序, 若稀疏数据则不预排序	是否预排序,预排序可以加速查找最佳分裂点, 对于稀疏数据不管用 • Bool ★ auto: 非稀疏数据则预排序, 若稀疏数据则不预排序
oob_score	附加	是否计算袋外得分 ★ False: 默认值	是否计算袋外得分 ★ False: 默认值		
random_state	附加	随机器对象	随机器对象	随机器对象	随机器对象

挑战 - 调优过程低效



应对挑战

- 总结经验
 - 确定可推广的规律
 - 发现不确定的范畴
- 提升效率
 - 更快、更好的规划计算资源

自动机器学习

- 构建于机器学习算法上的学习超参的算法 - 机器学习的机器学习。用机器学习的方法来学习超参。



自动机器学习 - 方向

- 超参数优化
 - 应用广泛
 - 其它方向也大量应用超参优化相关算法
 - 可推广到系统优化等非自动机器学习领域
- 神经网络架构搜索
 - 应用于深度学习
 - 前景广阔
- 特征选择
 - 应用于经典机器学习算法
- 模型压缩
 - 应用于深度学习
 - 新兴方向

与机器学习算法的比较

- 训练的特征（即超参数）较少，算法较简单。
- 训练结果可相互独立，找出指标最好的结果即可。
- 交互式学习，需要生成数据，与强化学习相似。
- 作为自动机器学习算法，其本身的超参数应越少越好，需要良好的自适应性。

机器学习概念 - 参数与超参数

- 参数 (Parameters) : 几十到上百亿个数值, 大部分是矩阵和向量。通过数据让计算机不断调优这些参数, 从而能学习到数据中的规律, 即知识。
- 超参数 (Hyper-parameters) : 需要手工设定, 模型不易自动调优的参数。如: 算法, 循环次数, 学习率, 神经元数量, 神经网络结构等。

机器学习概念 - 超参数：经典机器学习算法

- **DecisionTreeClassifier**(*, criterion='gini', splitter='best', max_depth=None, min_samples_split=2, min_samples_leaf=1, min_weight_fraction_leaf=0.0, max_features=None, random_state=None, max_leaf_nodes=None, min_impurity_decrease=0.0, min_impurity_split=None, class_weight=None, presort='deprecated', ccp_alpha=0.0)
- **LinearSVC**(penalty='l2', loss='squared_hinge', *, dual=True, tol=0.0001, C=1.0, multi_class='ovr', fit_intercept=True, intercept_scaling=1, class_weight=None, verbose=0, random_state=None, max_iter=1000)
- **GradientBoostingClassifier**(*, loss='deviance', learning_rate=0.1, n_estimators=100, subsample=0.1, criterion='friedman_mse', min_samples_split=2, min_samples_leaf=1, min_weight_fraction_leaf=0.0, max_depth=3, min_impurity_decrease=0.0, min_impurity_split=None, init=None, random_state=None, max_features=None, verbose=0, max_leaf_nodes=None, warm_start=False, presort='deprecated', validation_fraction=0.1, n_iter_no_change=None, tol=0.0001, ccp_alpha=0.0)
- **LogisticRegression**(penalty='l2', *, dual=False, tol=0.0001, C=1.0, fit_intercept=True, intercept_scaling=1, class_weight=None, random_state=None, solver='lbfgs', max_iter=100, multi_class='auto', verbose=0, warm_start=False, n_jobs=None, l1_ratio=None)
- **SGDRegressor**(loss='squared_loss', *, penalty='l2', alpha=0.0001, l1_ratio=0.15, fit_intercept=True, max_iter=1000, tol=0.001, shuffle=True, verbose=0, epsilon=0.1, random_state=None, learning_rate='invscaling', eta0=0.01, power_t=0.25, early_stopping=False, validation_fraction=0.1, n_iter_no_change=5, warm_start=False, average=False)

机器学习概念 - 超参数：深度学习算法

```
parser.add_argument('--batch-size', type=int, default=64, metavar='N', help='input batch size for training (default: 64)')
```

```
parser.add_argument('--test-batch-size', type=int, default=1000, metavar='N', help='input batch size for testing (default: 1000)')
```

```
parser.add_argument('--epochs', type=int, default=14, metavar='N', help='number of epochs to train (default: 14)')
```

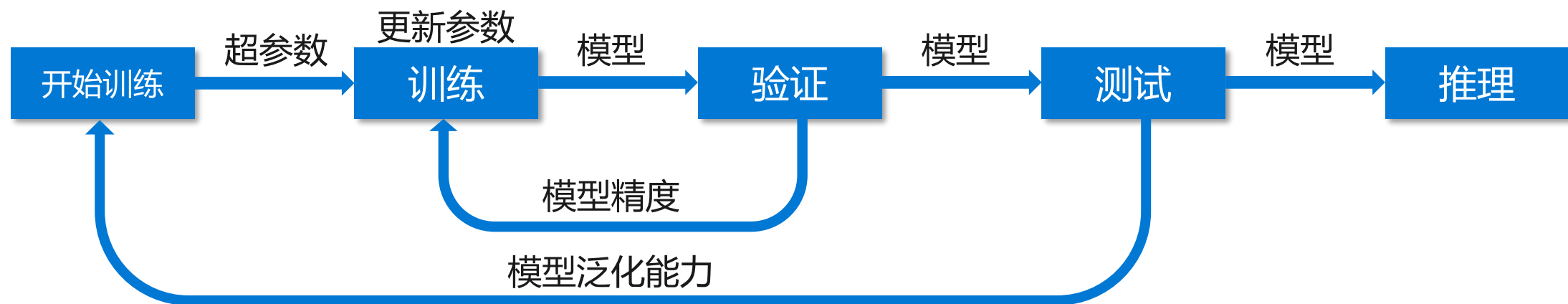
```
parser.add_argument('--lr', type=float, default=1.0, metavar='LR', help='learning rate (default: 1.0)')
```

```
parser.add_argument('--gamma', type=float, default=0.7, metavar='M', help='Learning rate step gamma (default: 0.7)')
```

机器学习概念 - 超参数：学习率

- 不同的算法、数据集的最优学习率不同。
- 学习率太大，结果震荡，不易收敛。
- 学习率太小，训练时间长，容易落入局部最优。

机器学习概念 - 参数与超参数



模型：参数和部分超参数

自动机器学习概念 - 搜索空间

- 选择超参，并限定其取值范围。
 - 搜索空间大，不易漏掉最佳超参组合，但需要的计算资源也多。
 - 搜索空间小，需要的计算资源少，但有可能漏掉了较好的超参组合。
- 常用类型
 - 枚举
 - 整数
 - 浮点
 - 均匀分布、正态分布、指数分布、正态指数分布：提高搜索效率
 - 分段：减少搜索空间

机器学习概念 - 算法

- 优化算法

- 尽量利用已有信息来获得更优结果。
- 算法：随机、遍历、进化、模拟退火、贝叶斯优化等。

- 评估算法

- 训练过程中，评估最终结果好坏的可能性。可提前终止较差结果的执行，从而节省计算资源。
- 算法：中位数、曲线拟合等。

自动机器学习中的概念 - 开发与探索

- 生成超参数的策略
- 开发 (Exploitation)
 - 在较好结果的搜索空间附近，继续尝试是否能找到局部最优结果。
- 探索 (Exploration)
 - 在覆盖较少的搜索空间进行探索，减少遗漏全局最优结果。
- 自动机器学习算法要在两者间取得平衡，有的算法会提供参数来控制两者的比例。

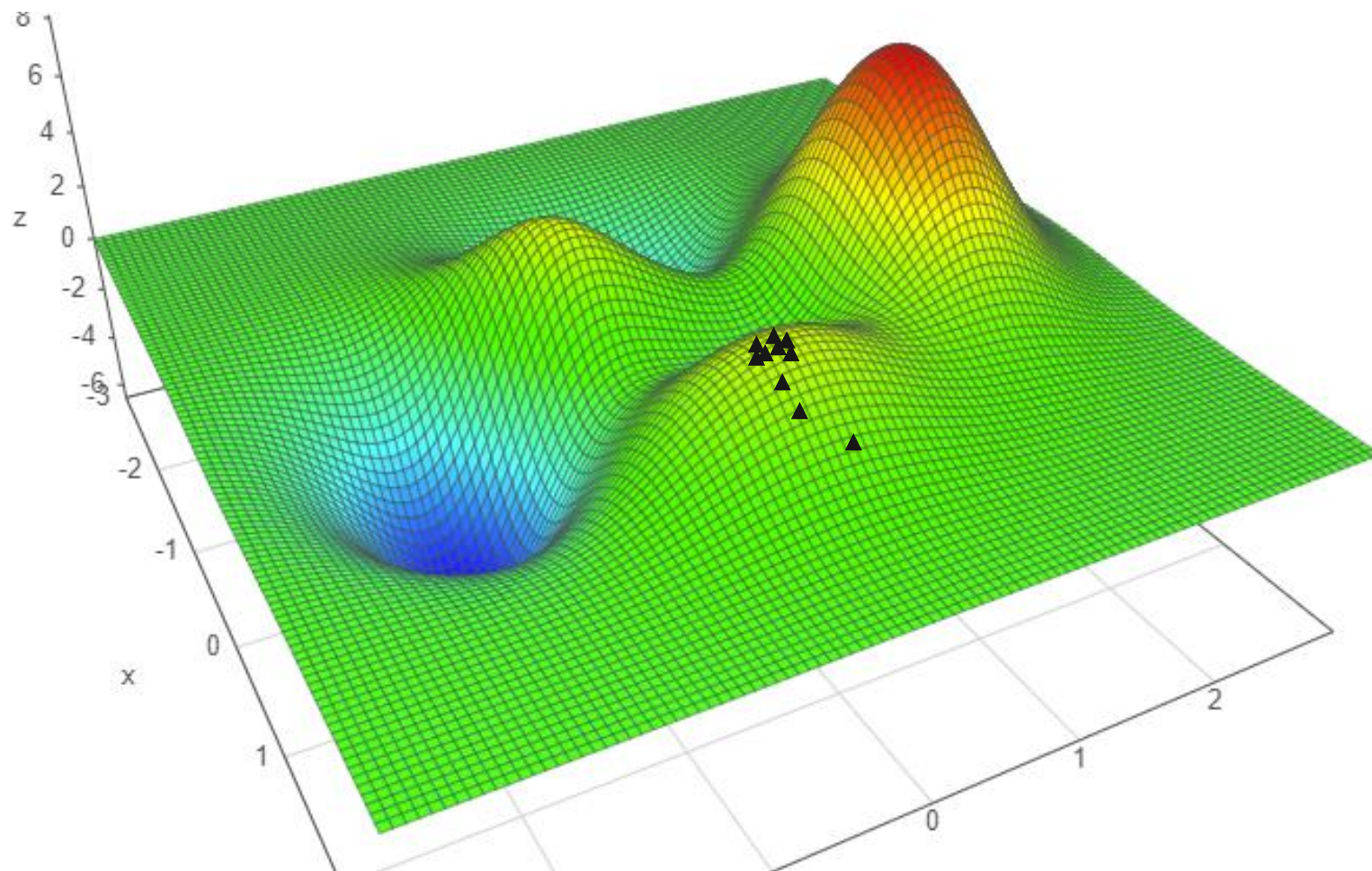
开发 (Exploitation) 与探索 (Exploration)

- 生成超参数的平衡策略
- 社会性动物采用类似的策略
 - 蚂蚁在寻找食物时，会四处探索。找到食物后，一部分会聚集到食物附近，开发食物资源。
 - 有的人倾向于探索新事物，扩展人类各方面（体育、科研、创新）的边界。有的人倾向于守成，让人类社会稳定存在。

开发 (Exploitation) 与探索 (Exploration)

- 开发 (Exploitation)

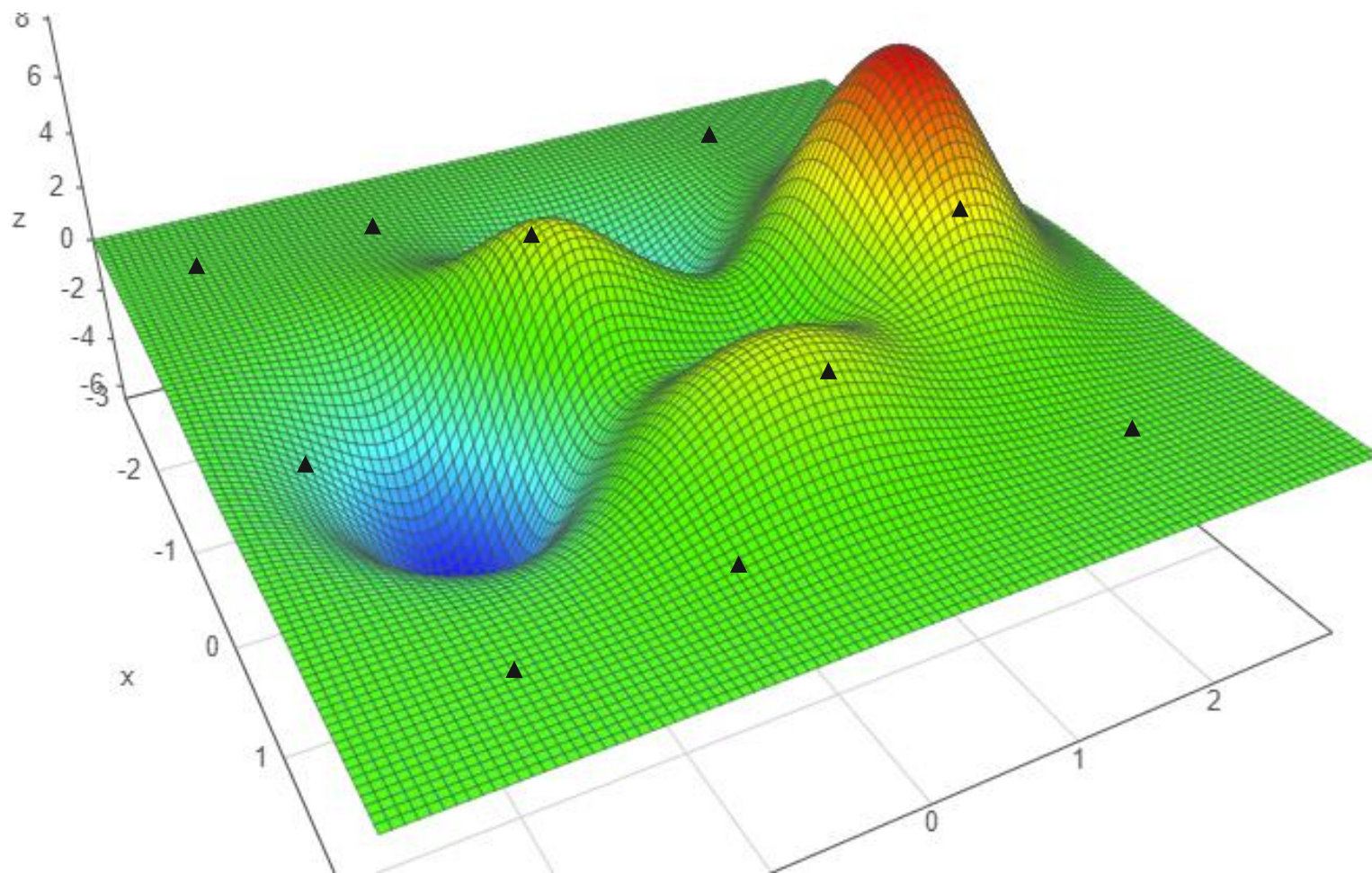
- 在较好结果的搜索空间附近，继续尝试是否能找到局部最优结果。
- 典型算法：贪心算法。



开发 (Exploitation) 与探索 (Exploration)

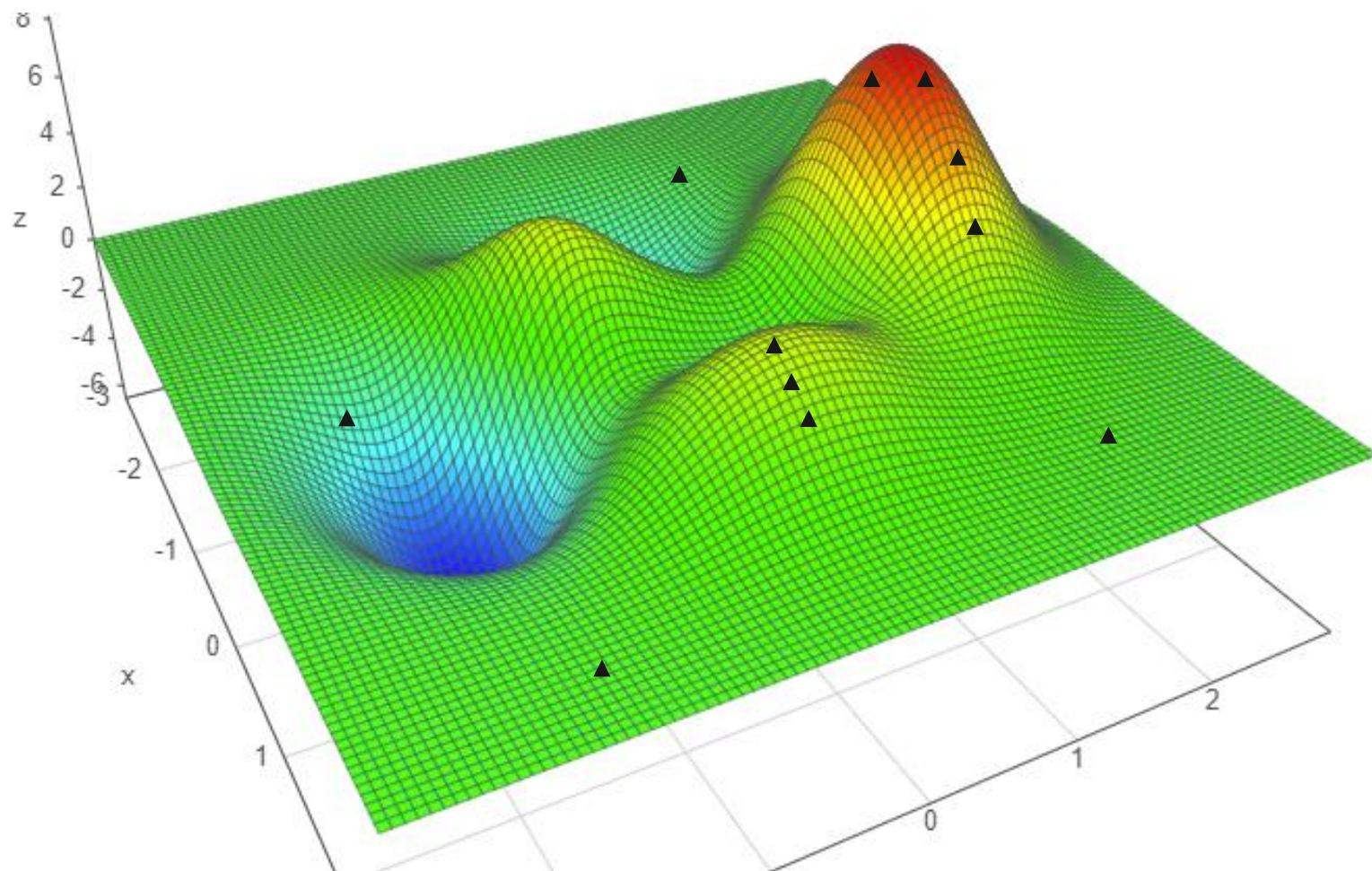
- 探索 (Exploration)

- 在覆盖较少的搜索空间进行探索，减少遗漏全局最优结果。
- 典型算法：随机



开发 (Exploitation) 与探索 (Exploration)

好的自动机器学习算法要在两者间取得平衡，有的算法会提供参数来控制两者的比例。



本章小结

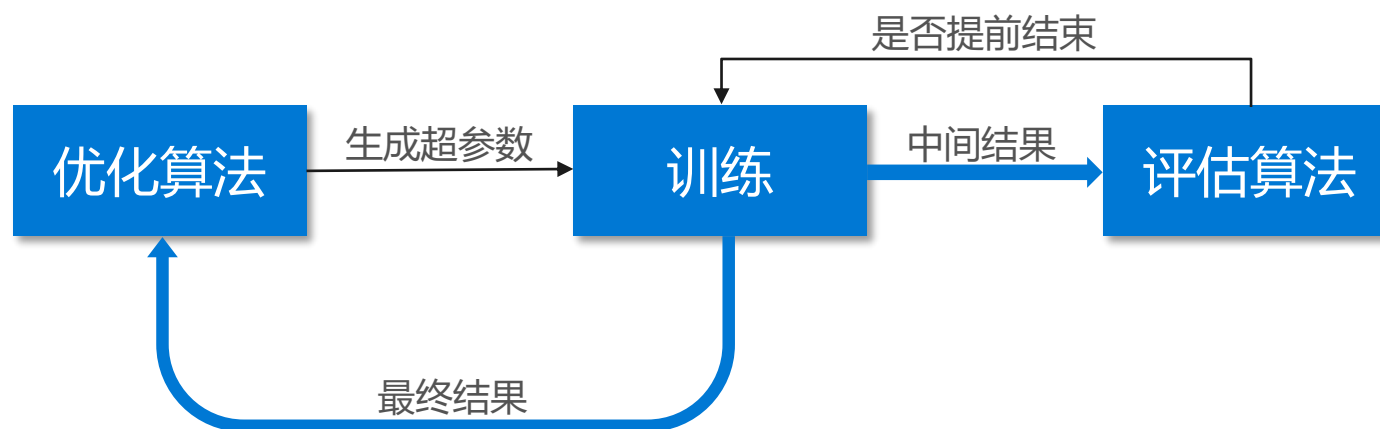
· 回顾

- 机器学习中的挑战
- 自动机器学习中的重要概念
 - 搜索空间
 - 自动机器学习主要算法类别：优化算法、评估算法
 - 开发 (Exploitation) 与探索 (Exploration)

· 思考

- 根据自己的机器学习经验，对某个算法的超参进行分析。看看哪些经验是可推广的，哪些是不确定的，需要试验的？
- 自动机器学习算法与一般机器学习算法相比，有哪些共同点和特点？

自动机器学习概念 - 算法



中间结果、最终结果：即模型的优化目标，如精度（Accuracy）、损失值（Loss）

优化算法 – 随机

- 随机选择每个超参数。

	随机
数值类型	支持所有数值类型
历史数据	不利用
开发与探索的平衡	相当于只探索，但无探索策略
搜索空间大小的适应	大搜索空间不易找到较优结果
其它特点	通常也能得出可接受的结果，可作为其它优化算法的基准

优化算法 – 遍历 (Grid Search)

- 遍历整个搜索空间，找到确定的最优解。

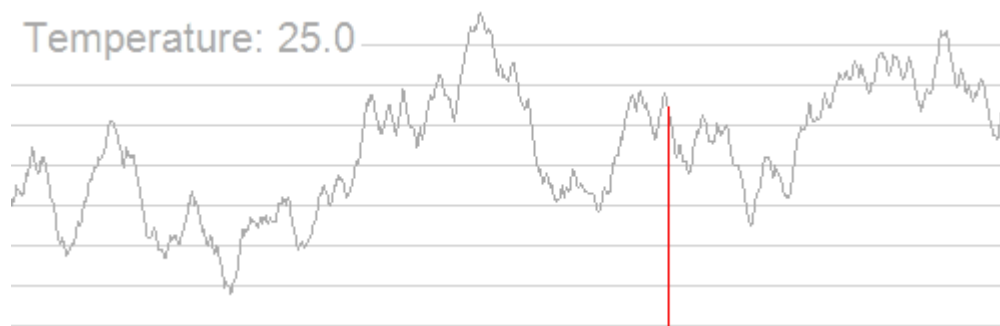
	遍历
数值类型	支持有限的数值类型，如枚举、整型、以及分段的浮点数
历史数据	不利用
开发与探索的平衡	尝试所有可能性
搜索空间大小的适应	搜索空间大小直接影响搜索时间
其它特点	仅适用于非常小的搜索空间

优化算法 – 模拟退火

- 固体在高温时，内部粒子呈无序状。让其徐徐冷却，粒子渐趋有序。通过此过程，让粒子间内能最小，更稳定。
- 模拟退火算法，从较高的初始温度开始，出发，这个温度称为初始温度，伴随着温度参数的不断下降，算法中的解趋于稳定，但是，可能这样的稳定解是一个局部最优解，此时，模拟退火算法中会以一定的概率跳出这样的局部最优解，以寻找目标函数的全局最优解。这个概率就与温度参数的大小有关，温度参数越大，概率越大，反之则越小。

优化算法 – 模拟退火

- 综合随机搜索与贪心算法。
 - 初期高温，有较高概率选择较差结果。
 - 后期温度下降，更倾向于选择较好结果。
- 若新结果较好则直接采用，否则以一定概率采用。



优化算法 – 模拟退火

	模拟退火
数值类型	支持各种数据类型
历史数据	使用历史数据来确定最优结果及温度
开发与探索的平衡	初期趋于探索，后期趋于开发
搜索空间大小的适应	大搜索空间不易找到较优结果
其它特点	

优化算法 – 进化

- 过程
 - 随机初始化多组超参进行训练（同随机算法）
 - 对结果较好的超参组合，随机变化少量参数后训练。

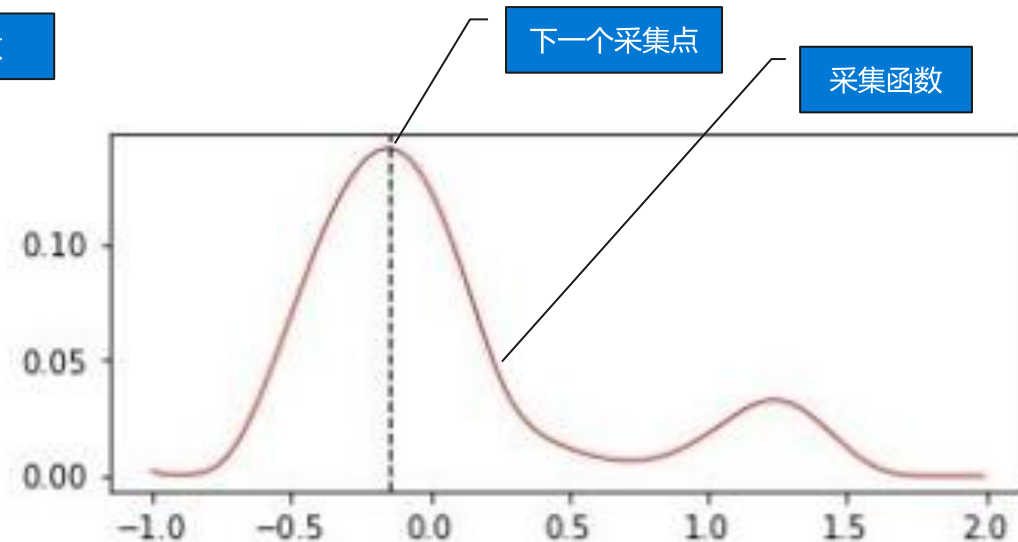
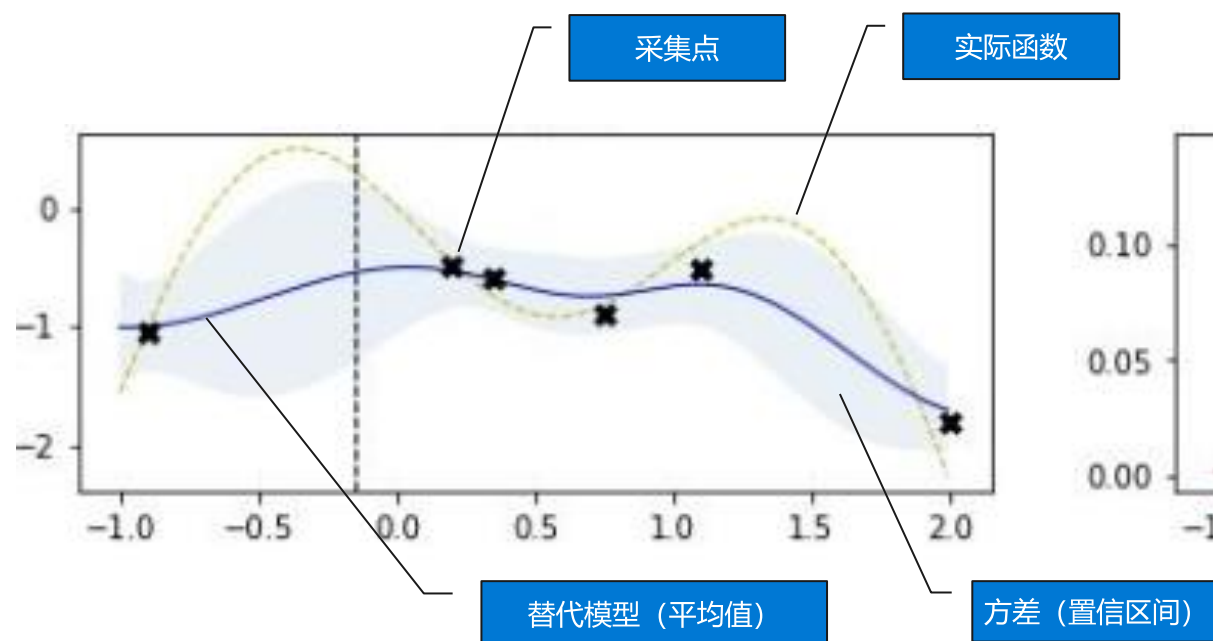
	进化
数值类型	支持各种数据类型
历史数据	使用历史数据来比较出较好的超参组合
开发与探索的平衡	初始种群越大，越倾向于探索。 变异的超参数量越多、变化范围越大，越趋向于探索。
搜索空间大小的适应	需要较多迭代次数
其它特点	

优化算法 – 贝叶斯优化

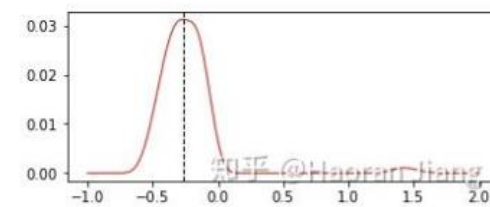
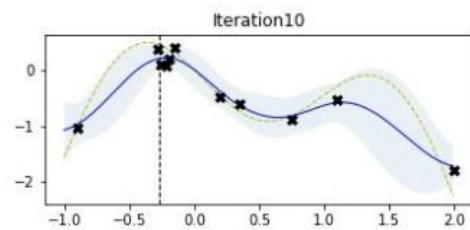
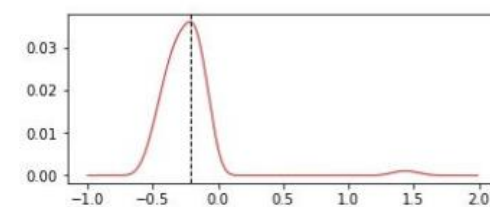
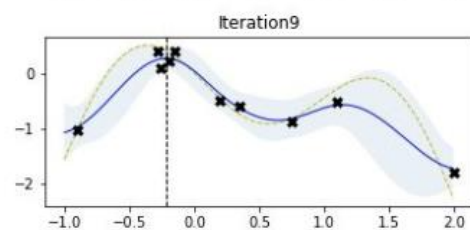
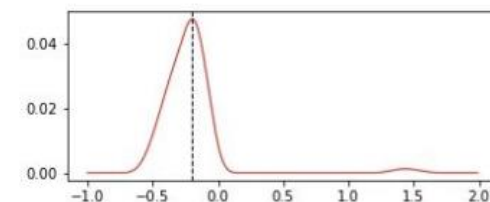
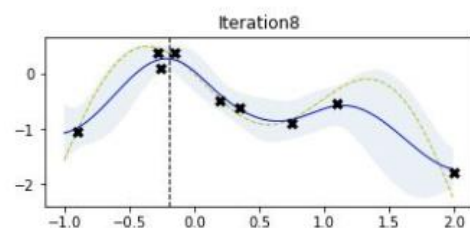
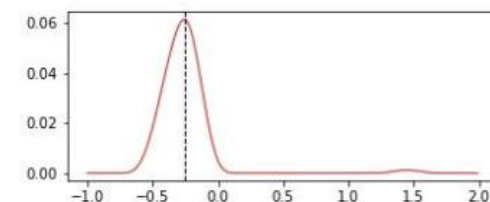
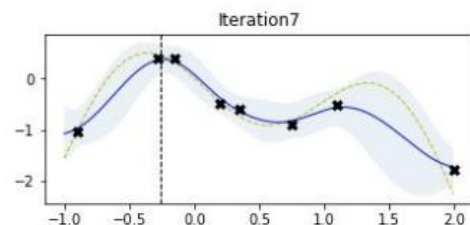
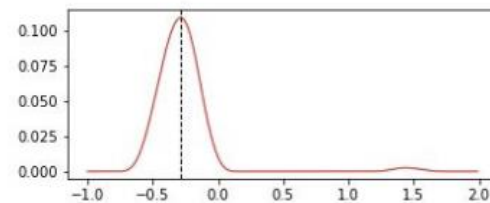
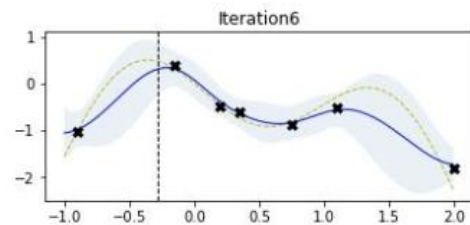
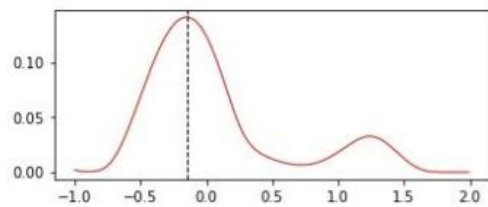
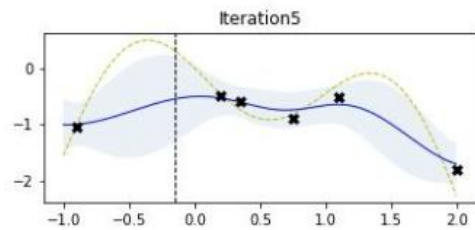
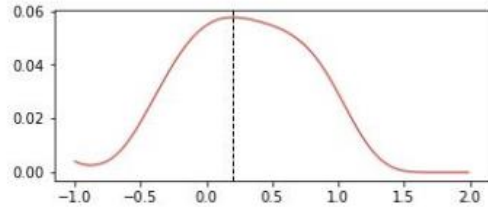
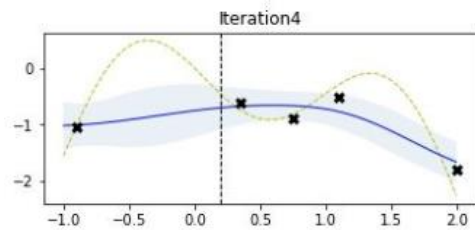
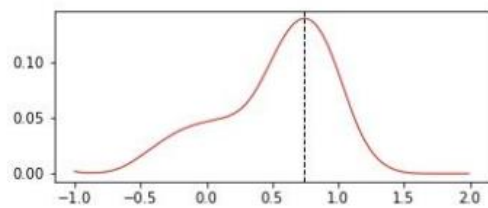
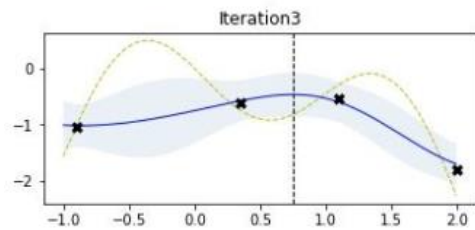
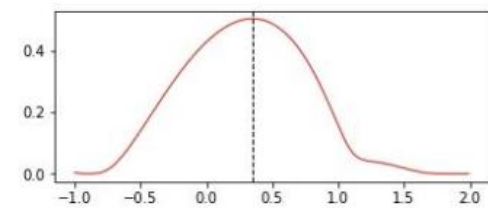
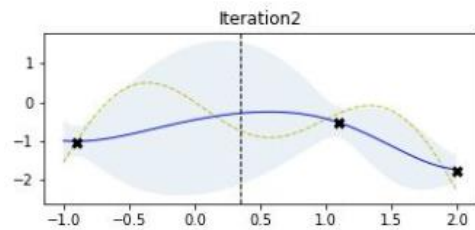
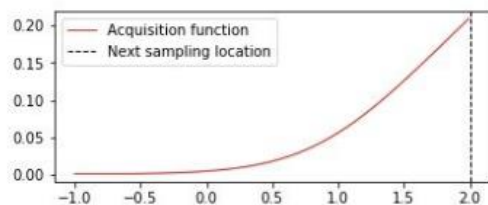
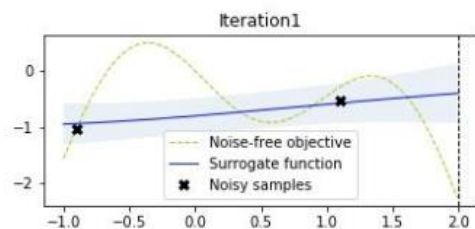
- 贝叶斯优化 (Bayesian optimization)
 - 基于模型的序列化全局优化算法 (Sequential Model-based Global Optimization)
- 替代模型 (Surrogate model) , 用成本更低的函数 (如, 高斯过程) 来拟合数据。
- 采集函数 (Acquisition function) , 评估价值, 确定下一个采集点。

优化算法 – 贝叶斯优化

- 替代模型 (Surrogate model)
 - 高斯过程 (Gaussian process)
- 采集函数 (Acquisition function)
 - 平均值和方差加权求和



优化算法 – 贝叶斯优化



优化算法 – 贝叶斯优化

- Tree-structured Parzen Estimator (TPE)
 - Tree Parzen Estimators
- Sequential Model-based Algorithm Configuration (SMAC)
 - 随机森林

	贝叶斯优化
数值类型	支持各种数据类型，以及数据间的级联关系
历史数据	替代模型使用历史数据来评估搜索空间
开发与探索的平衡	采集函数用于平衡开发与探索
搜索空间大小的适应	对较大搜索空间也较有效
其它特点	特别适合解决自动机器学习这类主动学习的问题。 如果并发数量较多，优化效率会下降。

优化算法 – 其它优化算法

- 强化学习类算法
- Hyperband、BOHB (Bayesian Optimization on Hyperband)
 - 先产生大量超参组合，运行一小段时间后，停掉大部分结果不佳的。

评估算法

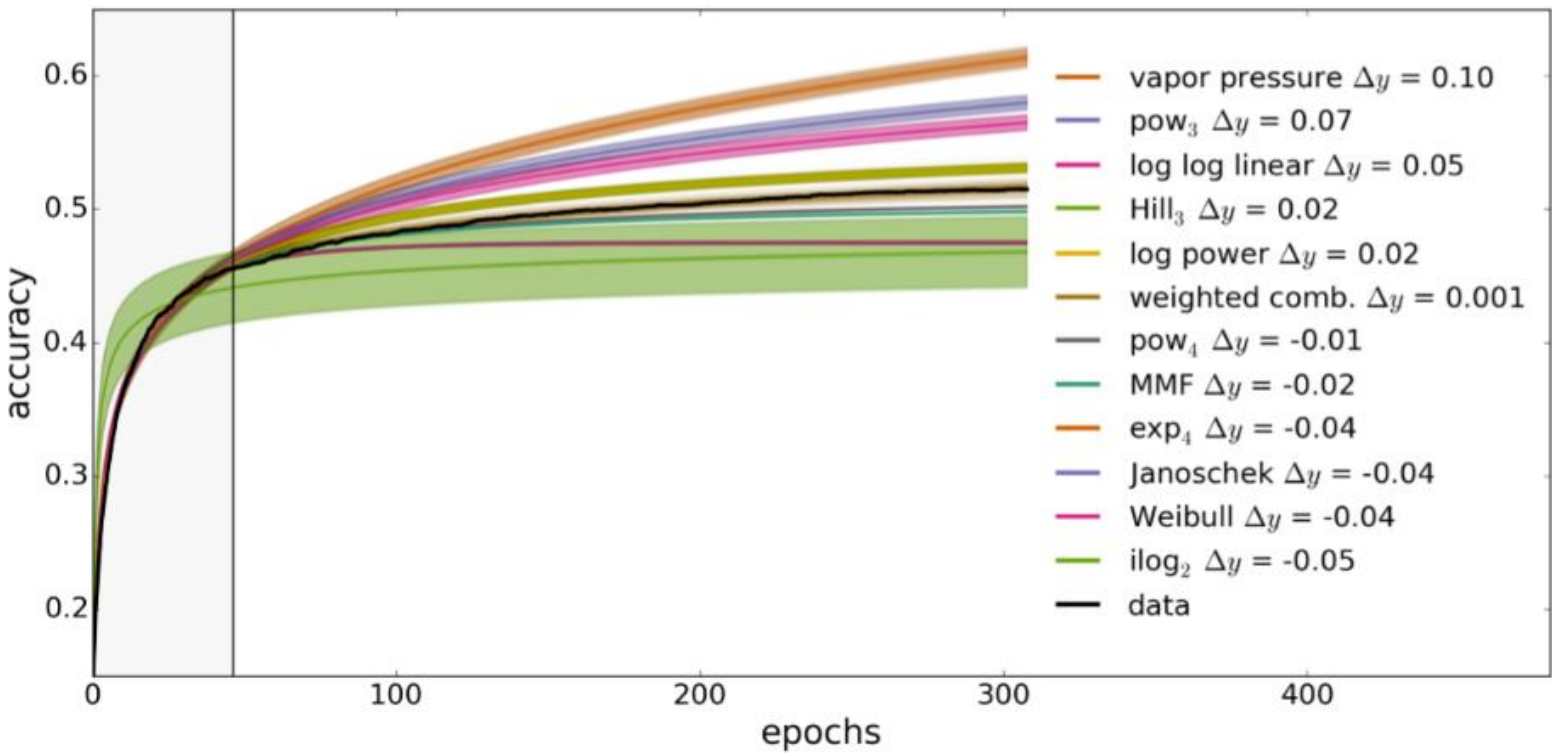
- 节约计算资源，通过训练的中间结果来提前预测最终结果。
- 常用算法
 - 中位数
 - 曲线拟合

评估算法 – 中位数

- 前 S 步的均值低于其它的前 S 步均值的中值，可终止。
- 计算量小，效果良好。

评估算法 – 曲线拟合

- 对一系列常见曲线进行加权拟合。
- 计算较复杂，较精确，仅适合递增的目标值。



Reference name	Formula
vapor pressure	$\exp(a + \frac{b}{x} + c \log(x))$
pow ₃	$c - ax^{-\alpha}$
log log linear	$\log(a \log(x) + b)$
Hill ₃	$\frac{y_{\max} x^{\eta}}{\kappa^{\eta} + x^{\eta}}$
log power	$\frac{a}{1 + (\frac{x}{e^b})^c}$
pow ₄	$c - (ax + b)^{-\alpha}$
MMF	$\alpha - \frac{\alpha - \beta}{1 + (\kappa x)^{\delta}}$
exp ₄	$c - e^{-ax^{\alpha} + b}$
Janoschek	$\alpha - (\alpha - \beta)e^{-\kappa x^{\delta}}$
Weibull	$\alpha - (\alpha - \beta)e^{-(\kappa x)^{\delta}}$
ilog ₂	$c - \frac{a}{\log x}$

本章小结

· 回顾

- 优化、评估算法在自动机器学习过程中的作用
- 优化算法
 - 随机、退火、进化算法
 - 贝叶斯优化的思想和概念：替代模型、采集函数
- 评估算法
 - 中位数
 - 曲线拟合

· 思考

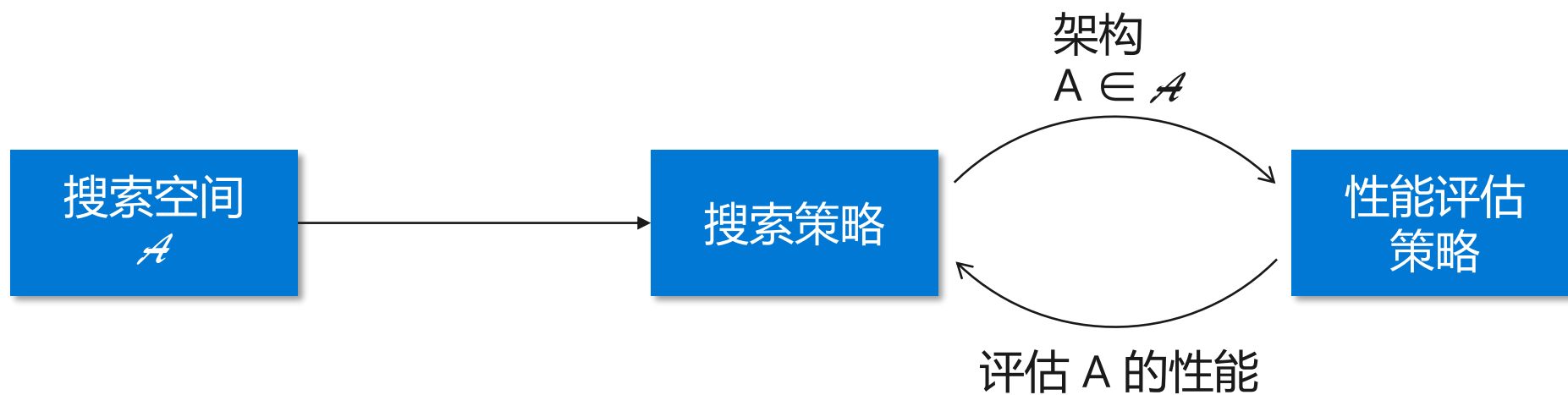
- 自学 Hyperband, BOHB 算法, 了解它们的核心, 以及是如何平衡开发和探索的?
- 并发运行对贝叶斯优化有什么影响, 如何改进?
- 评估算法对优化算法会产生什么影响, 如何改进?
- 如何实现递减的曲线拟合评估算法, 需要注意什么?

自动机器学习其它方向与应用

- 大部分都使用了优化算法
- 应用方向
 - 神经网络架构搜索
 - 模型压缩
 - 特征选择
 - 需要初始化参数的系统优化评估

神经网络架构搜索

- Neural Architecture Search (NAS) - 生成并评估不同神经网络结构来找到更好的网络结构。
- 深度学习上，超参优化应用于现有的神经网络架构参数，一般不修改神经网络结构。

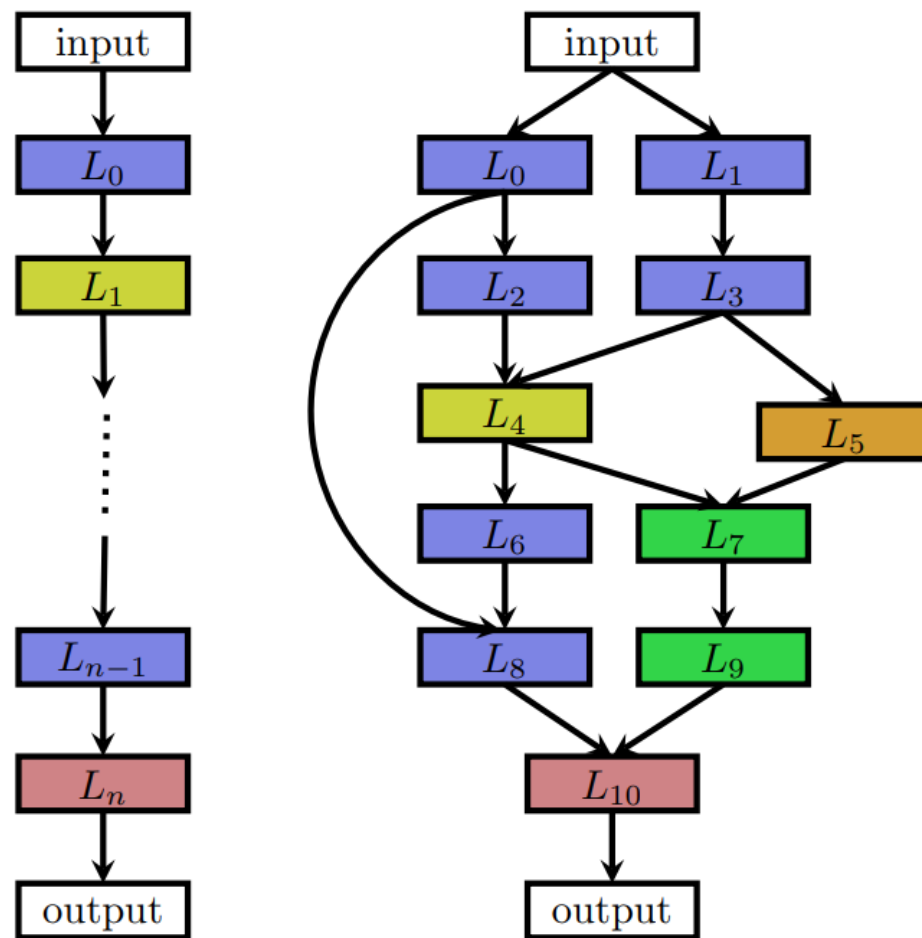


神经网络架构搜索

- 搜索空间
 - 通过先验知识构建
 - 易于搜索
- 搜索策略
 - 平衡开发与探索
- 性能评估策略
 - 尽量节约资源，不进行完整的训练和验证过程

神经网络架构搜索 – 搜索空间

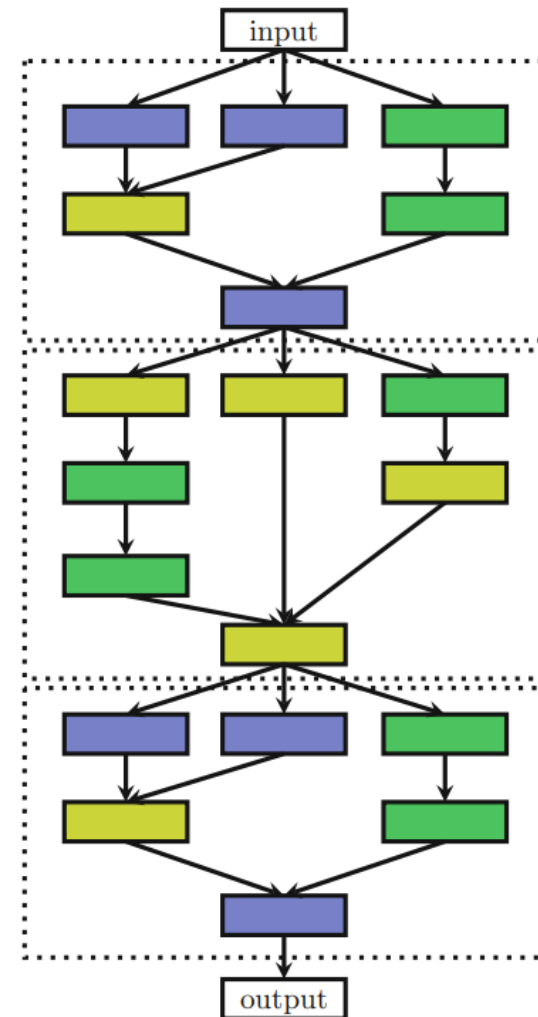
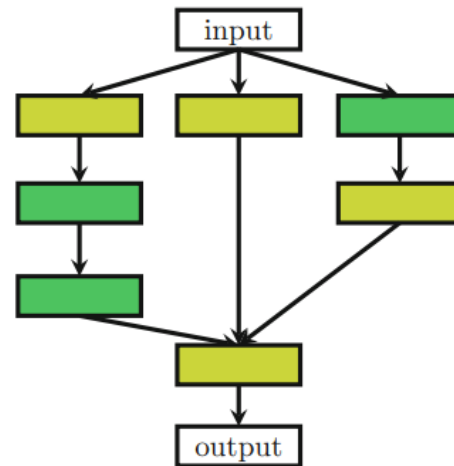
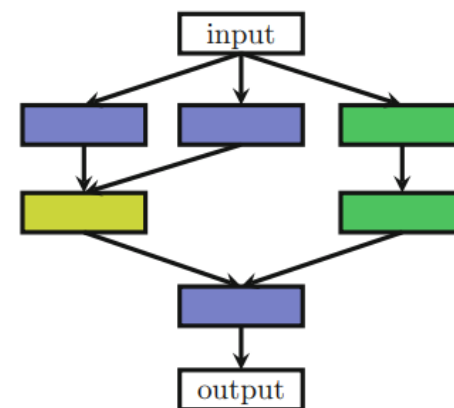
- 左侧为单一链式神经网络，层数、层算法及其超参数作为搜索空间。
- 右侧有分支、跳跃连接，可作为搜索空间。



L_i 神经网络层

神经网络架构搜索 – 搜索空间

- 将细胞 (cell、block) 子网络作为模块进行训练。
 - 普通细胞网络：输入输出维度相同。可组合任意数量个。
 - 降维细胞网络：输出维度变少。
- 可增加普通细胞子网络，而不影响输出的结构。
- 优点
 - 搜索空间大大减小。
 - 细胞子网络可迁移到其它数据集。



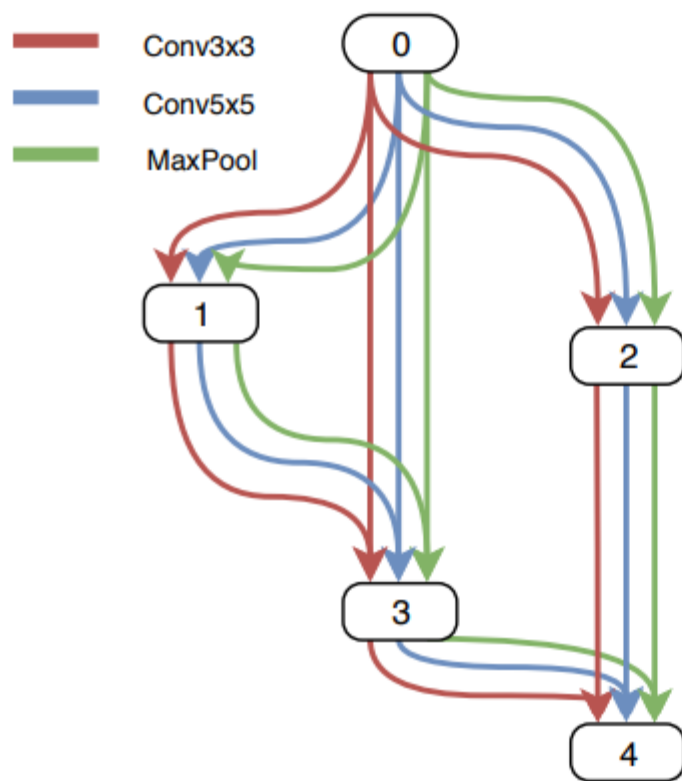
神经网络架构搜索 - 搜索策略

- 超参优化算法：随机、进化、贝叶斯优化等。
- 强化学习算法
 - 将参数生成看作代理的动作。
 - 将已训练架构的评估看作奖励。

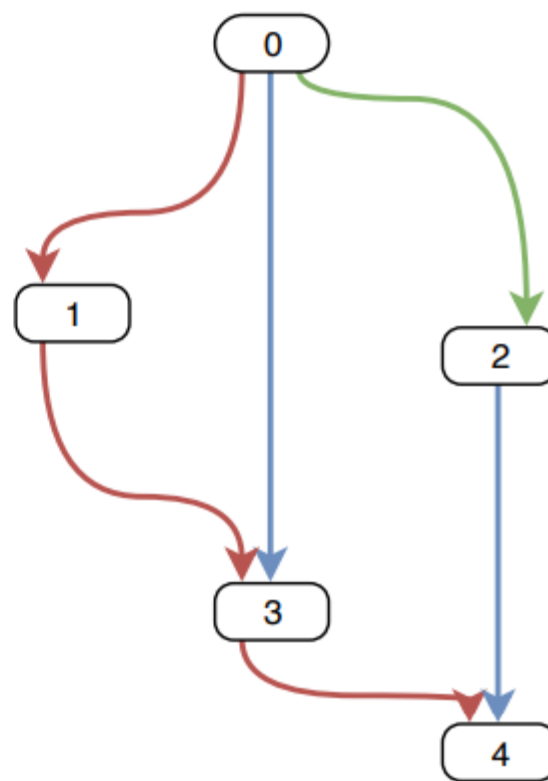
神经网络架构搜索 - 性能评估策略

- 完整训练：结果可靠、计算资源消耗大。
- 通过低精度训练评估，选好神经网络后，再进行完整训练。
 - 使用少量数据
 - 低精度数据（低分辨率图片）
 - 减少迭代次数，通过曲线拟合等方法估计。
- 每次训练后共享权重。
- 一次性（one-shot）架构搜索
 - 共享子网络间的权重，并训练子网络。
 - 仅通过推理来评估。

神经网络架构搜索 – one-shot



超网络



子网络

模型压缩

- 神经网络规模越来越大，最大的已有上百亿参数。
- 神经网络模型中均存在一定的冗余信息。
- 主要压缩方向
 - 剪枝 (Pruning)：将冗余神经元甚至通道的权重设置为 0，使其不起作用。
 - 量化 (Quantization)：降低浮点数精度。

模型压缩 – 剪枝

- 剪枝阶段
 - 一次性剪枝，对训练完成的模型进行一次剪枝
 - 迭代剪枝，在训练过程中逐步剪枝
- 神经元重要性评估方法
 - 权重、输出激活值评估
- 评估值
 - 中位数、绝对值（L1）、平方和（L2）。
- Lottery Ticket Hypothesis：训练一定次数后剪枝，用同样的初始参数再次初始化并训练。从而找到最佳的剪枝方案。

特征选择

- Feature selection, 又称降维。通常应用于结构化数据, 而非图像、文本、语音等非结构化数据。
- 作用
 - 减小数据获取成本
 - 提高计算效率。
- 防止过拟合

特征选择方法

- 过滤方法：通过特征的统计值等，一次性选择出特征。小数据量时，速度快。大数据量时无法使用。
 - 主成分分析（PCA）：无监督，保留差异最大的特征，如方差。
 - 线性判别分析（LDA）：有监督，找出分类效果最好的特征。
- 递归方法：迭代选取子集，并通过训练评估。适合绝大多数场景，但训练过程时间相对较长。
- 嵌入式方法：结合一次性选择和递归方法，通过算法来选择子集。

系统优化

- 复杂软件系统通常有一些配置参数，以便适应不同的应用场景。
- 数据库
 - 不同场景下的配置
 - 数据量级。小规模数据甚至可全部放在内存中，PB级数据需要服务器集群来存取。
 - 数据高可用和灾备的要求。数据备份和同步需要额外时间。
 - 数据间关联。数据关联越多，单次数据操作需要的读写负载越大。
 - 数据读写频率。写入较多的数据需要更多优化写入效率，读取较多的则相反。
 - 数据特点。如：向量数据需要近似数据查询。文本数据可能需要全文索引。

系统优化 - 向量数据库

- 应用

- 对词语、句子嵌入（Embedding）的计算和查询，是自然语言应用中非常重要的中间数据结构。

- 特点

- Embedding 值通常为的一组浮点数组成的向量。
- 向量数据库可综合多种算法来平衡读写需求。
 - kd-tree：树结构，写入效率高。
 - k-means：图结构，查询效率和精度高。

- 参数对系统的影响

- 存储大小、索引构建时间、索引质量、搜索延迟。
- 在数据库构建前，大部分参数需要确定。

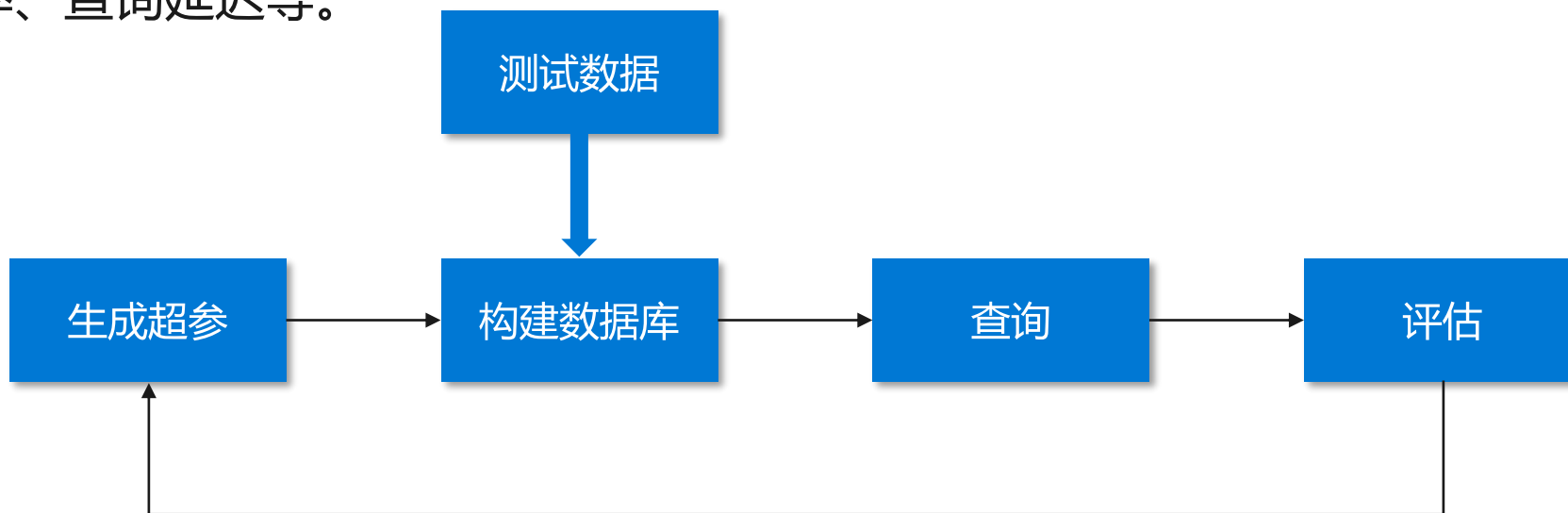
系统优化 - 向量数据库

- 超参数

- 初始化参数，如：近邻图的邻居数量、树的子节点数量。

- 评估指标

- 召回率、查询延迟等。



本章小结

· 回顾

- 神经网络架构搜索
 - 搜索空间：层操作、连接操作、子网络
 - 搜索策略：超参搜索类算法、强化学习算法
 - 性能评估策略：完整训练、低精度训练、权重共享、一次性搜索
- 模型压缩：剪枝、量化
- 特征选择：过滤、递归、嵌入
- 系统优化

· 思考

- 神经网络架构搜索和超参搜索相比，在哪些方面有优势？
- 在系统优化上，自动机器学习还可以有什么具体应用？

自动机器学习系统

- 端到端
- 辅助优化

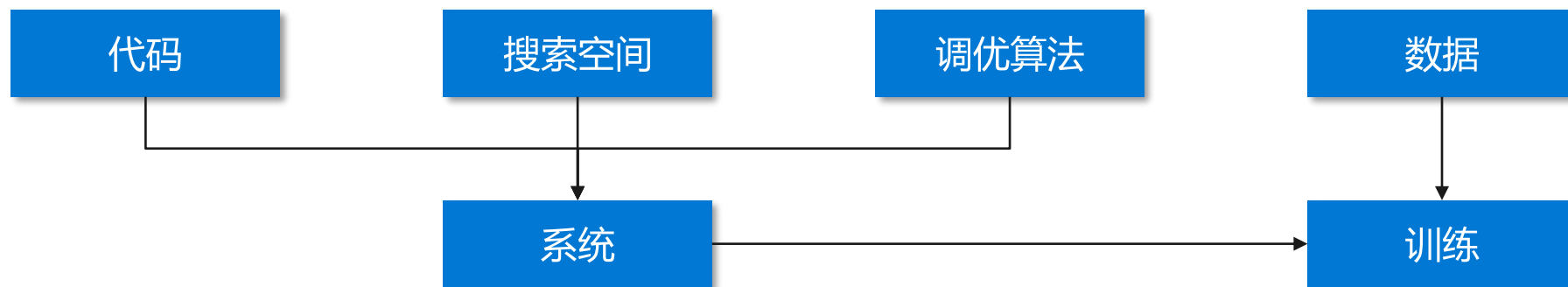
自动机器学习系统 – 端到端

- 输入数据，输出模型。
- 使用系统预先配置好搜索空间、网络模型。
- 优点
 - 简单易用，可直接提供推理服务。适合无机器学习经验的任何人使用。
- 缺点
 - 场景有限，如自然语言的应用场景非常广泛，如翻译、搜索、摘要生成等，需要分别开发。
 - 不能结合人工经验，模型性能可能会受到影响。



自动机器学习系统 – 辅助优化

- 输入代码、数据、搜索空间，输出搜索结果或模型。
- 优点
 - 结合人工经验，功能强大，适合机器学习领域人员使用。
 - 几乎适合任何场景。
- 缺点
 - 需要有编程经验和一定的机器学习领域知识。

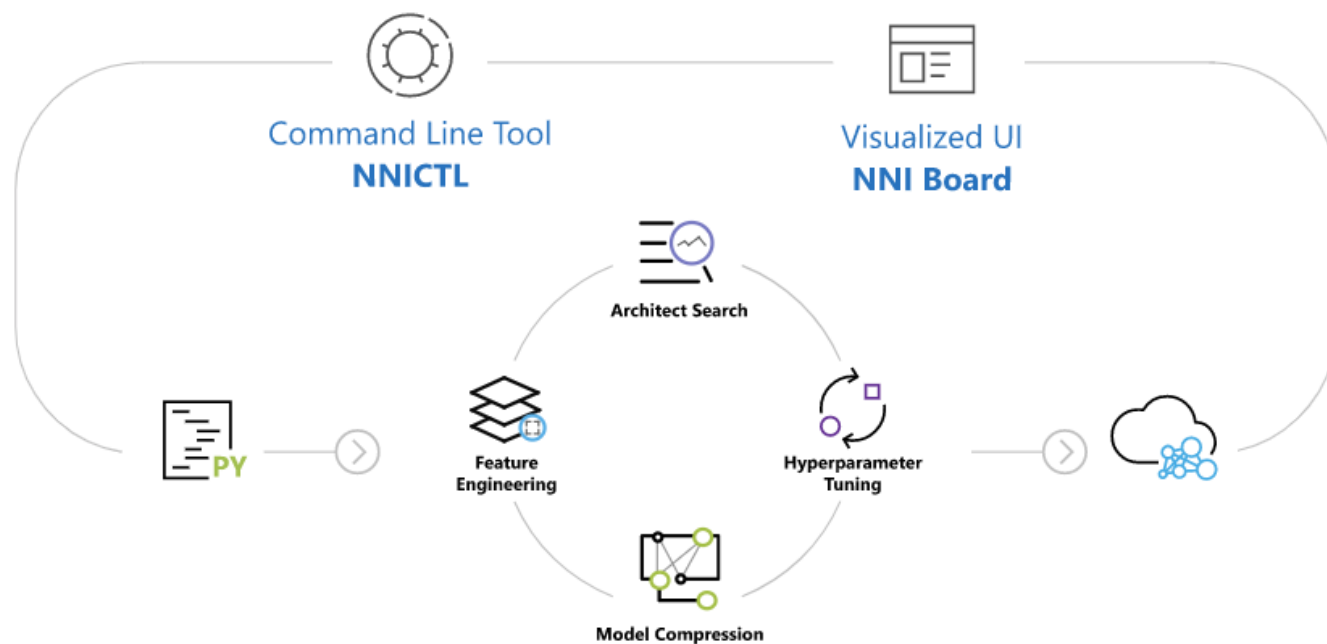


自动机器学习系统 – 功能

- 集成自动机器学习算法
 - 将机器学习算法与自动机器学习算法相分离。
- 管理计算资源
 - 通过多环境来并行评估超参组合。
- 提供分析工具
 - 分析超参和结果的相关性，可进一步优化搜索空间。
- 输出最佳参数配置或最终模型
 - 一些NAS算法只需要输出最佳参数配置，再进行最终训练

自动机器学习系统 – 实例

- Neural Network Intelligence (NNI)
 - <https://github.com/microsoft/nni>
- 易于安装
 - `pip3 install nni`
- 集成算法、训练平台多
- 提供可视化监测和分析界面
- 开源项目，便于学习



本章小结

- 回顾

- 功能：集成自动机器学习算法、管理计算资源、提供分析工具、输出结果。
- 端到端：最大化易用性
- 辅助优化：覆盖场景广泛

- 思考和实践

- 使用 NNI 进行一次自动机器学习，体验并思考自动机器学习系统的价值。
- 了解端到端的自动机器学习系统，它们都用来解决了哪些领域的问题？

自动机器学习的局限

- 资源消耗高，大部分机器学习算法需要大量资源。
- 与有经验的人工优化结果相当。

前沿

- 神经网络架构搜索

- 更高效搜索方法，节约计算资源。
- 更通用的算法评估方法，帮助筛选出更合适的算法。

- 自动机器学习系统

- 更通用的算法集成方案，覆盖模型压缩等新兴的自动机器学习领域。
- 更高效的性能评估方法，节约计算资源。

本章小结

- 思考

- 结合自己的机器学习经验，还有哪些方面可能是自动机器学习的前沿？
- 结合使用 NNI 等自动机器学习系统的经验，还有哪些方面需要完善？

参考资料

- NNI: <https://nni.readthedocs.io>
- 模拟退火: https://en.wikipedia.org/wiki/Simulated_annealing
- 高斯过程和贝叶斯优化: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/86386926>
- Bayesian optimization: <http://krasserm.github.io/2018/03/21/bayesian-optimization/>
- Algorithms for Hyper-Parameter Optimization: <https://papers.nips.cc/paper/4443-algorithms-for-hyper-parameter-optimization.pdf>
- Neural Architecture Search: A Survey: <https://arxiv.org/pdf/1808.05377.pdf>
- Feature selection: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2016/12/introduction-to-feature-selection-methods-with-an-example-or-how-to-select-the-right-variables/>