

启发式优化

吕志鹏

研究员，博士生导师

zhipeng.lv@hust.edu.cn

计算科学理论研究所 常务副所长

华中科技大学 计算机科学与技术学院

<http://smart.hust.edu.cn/lui/>

提纲

- 启发式优化
- 适用的问题类及计算复杂性理论
- 智能优化算法概述
- 智能优化算法详述

启发式优化

智能决策与优化

- * 在通信、交通、物流、供应链管理、网络规划、军事等实际应用中，存在大量的复杂的决策和优化问题。
- * 其一般具有规模大、约束多、不确定性、多目标等特点。
- * 这类复杂的多约束决策和优化问题，往往被归结为NP完全问题，甚至为强NP难问题或者超NP难问题。
- * 因此，运用传统的数学的、精确的求解算法往往无法对其进行求解。

智能决策与优化

- * 在这种情况下，智能决策优化方法便成为唯一可行的方法，它也是人工智能、运筹学和计算机领域共同关注的研究热点。
- * 智能决策与优化主要通过放弃数学的严格性，而采用近似的方法寻找问题的近似最优解。
- * 智能决策与优化方法不仅依靠一系列系统的搜索算法和策略，同时特别强调问题结构的理解。
- * 本质上讲，智能决策与优化方法实际上是对人类求解问题的直觉和经验的一种系统化和精确化的描述。因此，智能决策与优化也称为启发式决策和优化。

国际竞赛

在完全统一的计算平台上比较算法的优劣:

- 1996年 国际SAT竞赛 **冠军** 黄文奇
- 2005-2011年 国际SAT竞赛 **1冠 2亚 2季** 李初民
- 2008年 国际时刻表调度竞赛 **亚军** 吕志鹏
- 2010年 国际护士排班竞赛 **季军** 吕志鹏
- 2012年 Google EURO挑战赛 **全球第9, 亚洲第1** 吕志鹏

适用的问题类及计算复杂性理论

适用的问题

- * 智能决策与优化算法主要适用于具有NP难度的大规模的、困难的、复杂的实际优化和决策问题，如：
 - * 航空交通领域：飞机起飞、降落调度；机场保障调度；空乘人员、地面保障人员的排班调度；航空线路的规划；航空流量控制；航空中断管理等。
 - * 物流和供应链管理：路径优化；作业车间调度；流水车间调度；装配线调度；集装箱布局优化；设备选址问题；仓库管理。
 - * 通信领域：频率分配；网络拓扑规划；网络路由。

优化问题

■ 给定搜索空间 S 和目标函数 f

- Given a search space S which represents feasible solutions
- Given an objective function $f: S \rightarrow R$
- Find $s^* \in S$ such as :

$$f(s^*) \leq f(s) \quad \forall s \in S$$

s^* : global optimum

- 优化是运筹学的核心，起源于二战，战后广泛应用于民用的各个领域。
- 科学研究和工业应用中出现大量的优化问题(通信、交通、物流、供应链、军事、金融等)。

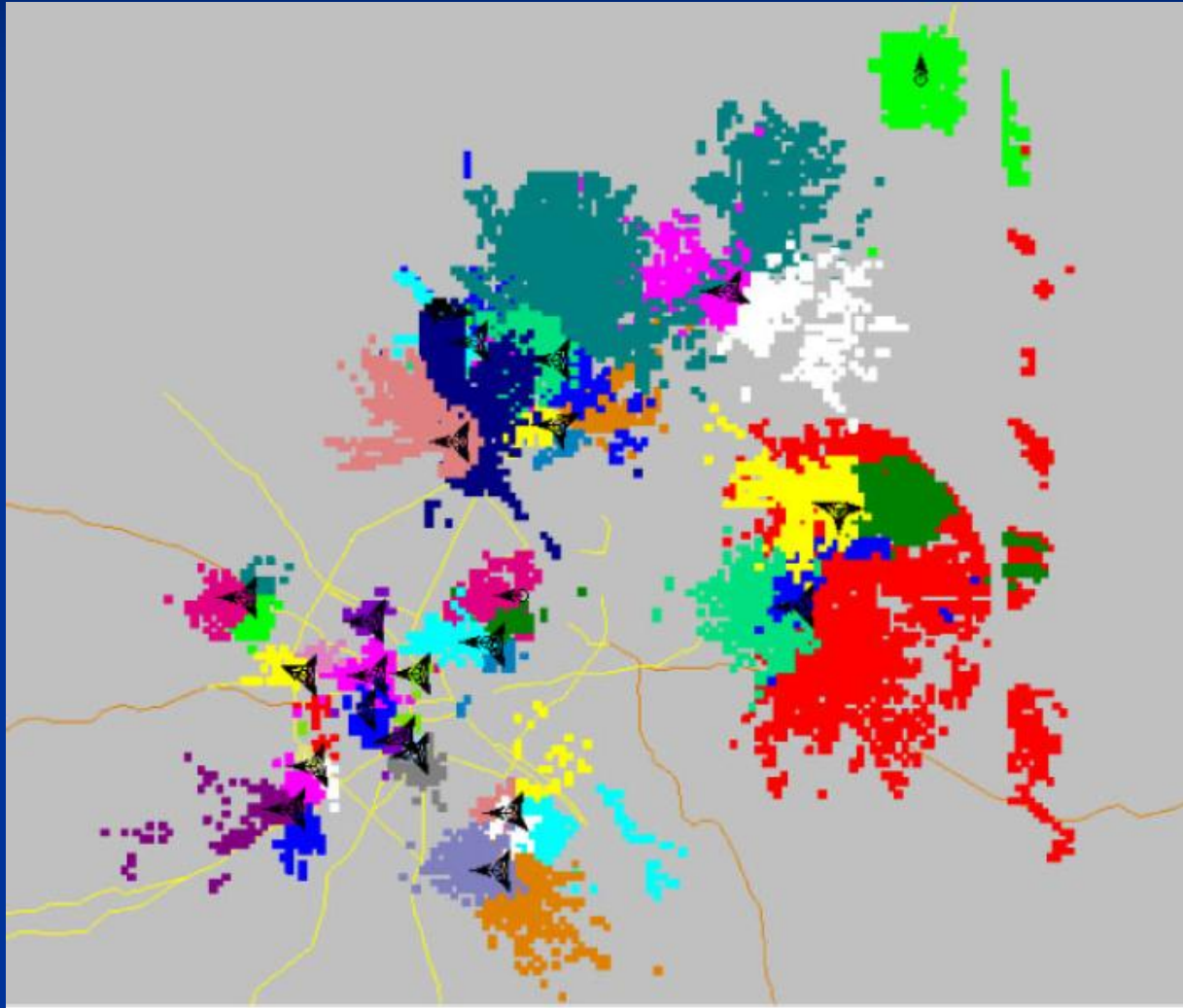
计算复杂性理论： 问题

- 问题的复杂度=求解该问题最好的算法的时间复杂度
 - **P问题**（容易）= 存在多项式时间复杂度的算法
 - **NP问题**（困难）= 不存在多项式时间复杂度的算法
- 实际应用中绝大多数问题为NP难度问题，如旅行商问题（TSP）、车辆路由问题（VRP）、装箱问题（Bin-Packing）、作业车间调度问题（Job Shop Scheduling）等。

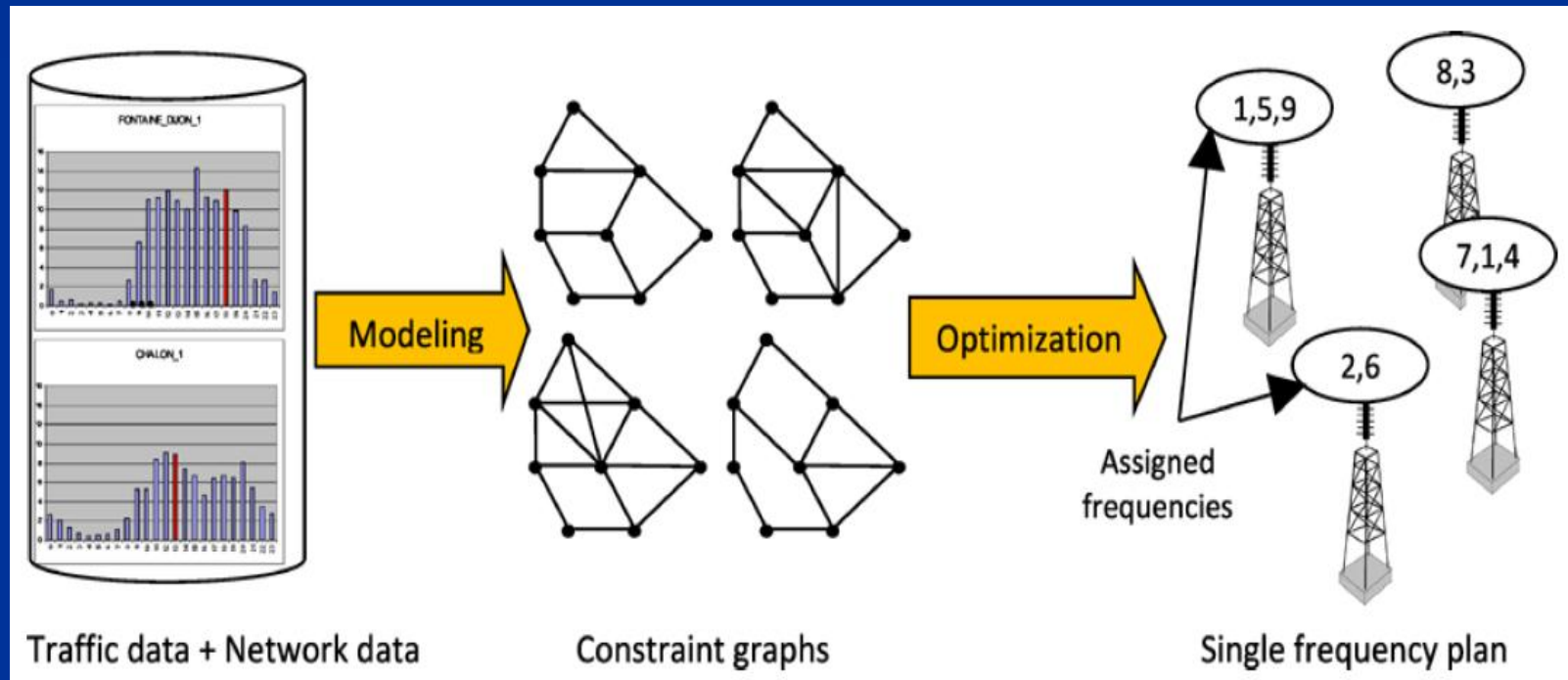
经典的NP难度问题

- 最大团问题——0-1问题
- 多维背包问题、装箱问题——0-1问题
- 图着色、图划分问题——划分问题
- 选址问题、覆盖问题——划分问题
- 旅行商问题、车辆路由问题——排序问题
- 作业、流水、柔性车间调度——排序问题
- 实际应用中的组合优化问题往往是这些经典问题的推广或组合：如时刻表调度、人员排班调度、卫星排照片、无线频率分配问题、铁路网络规划、光网络规划等等。

案例1：频率分配



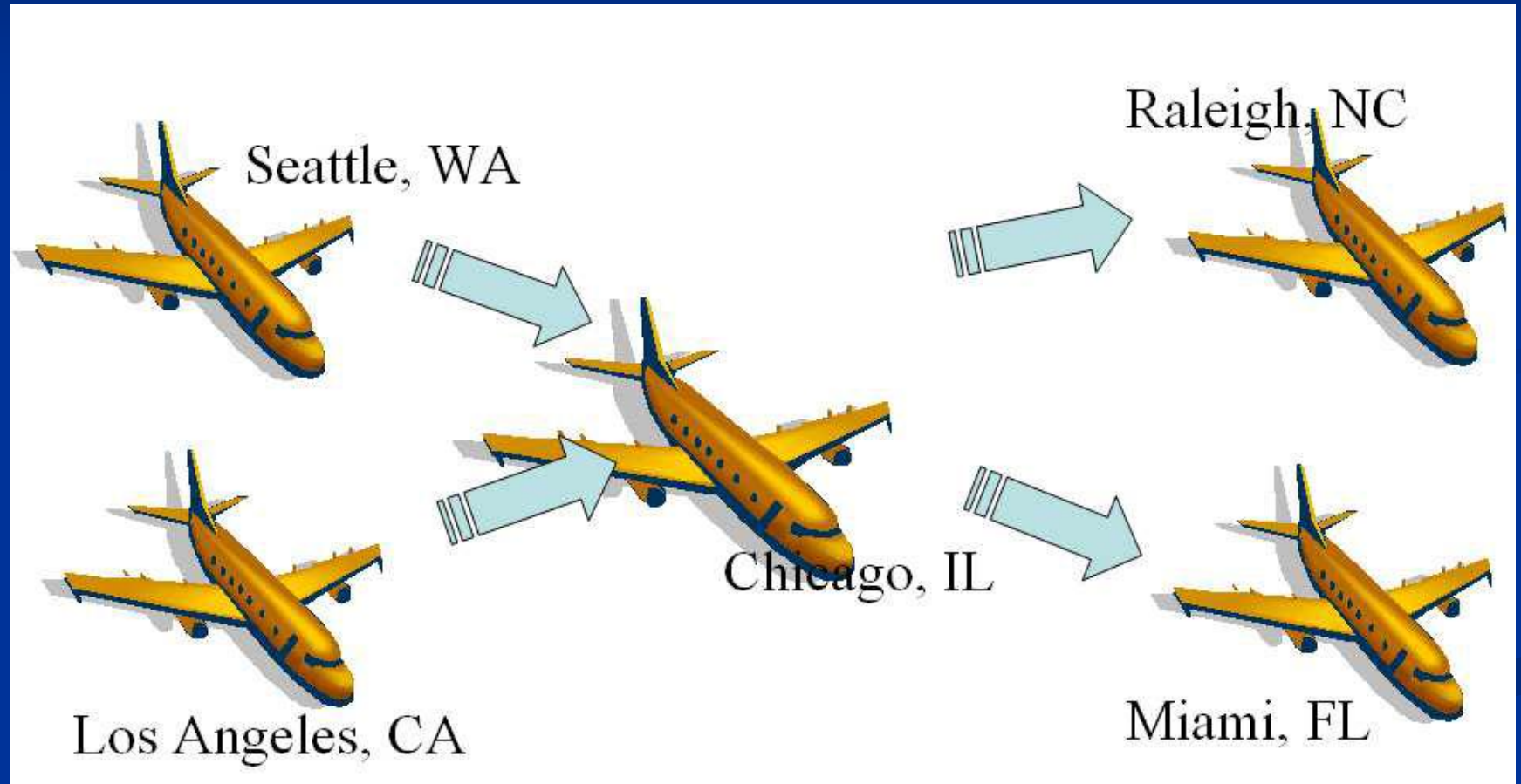
案例1：频率分配



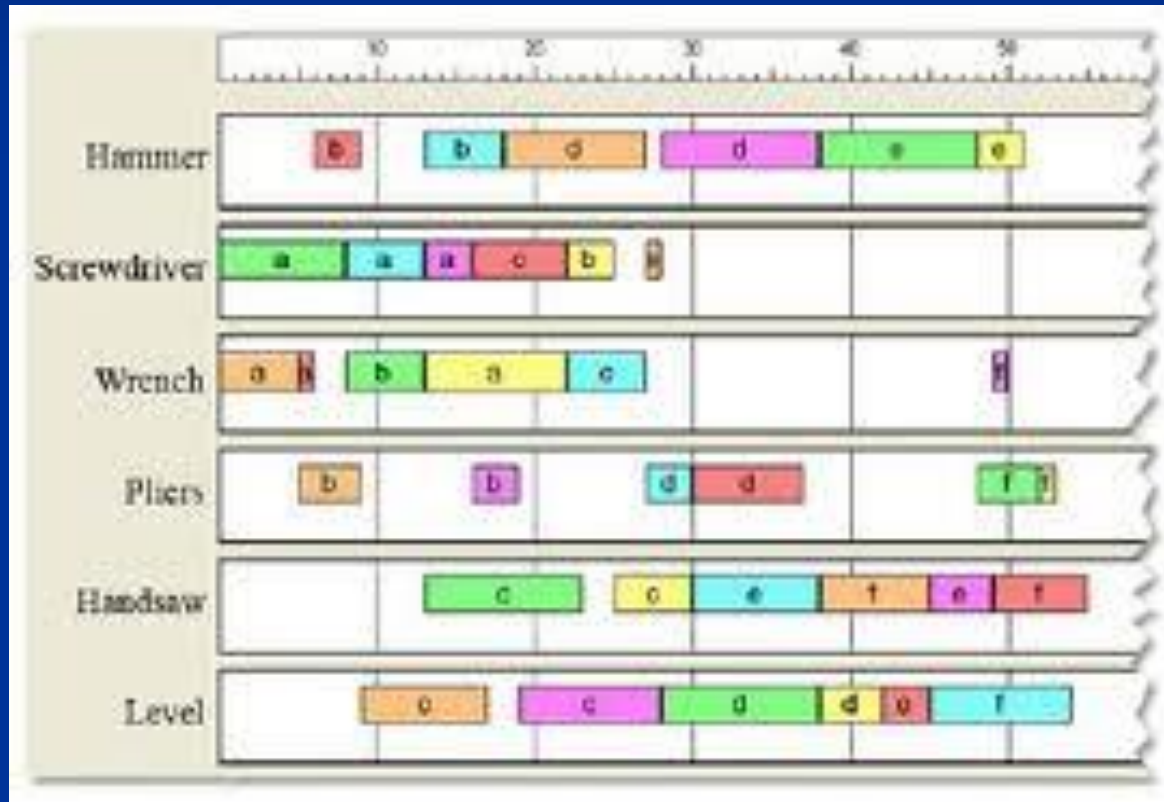
案例2：飞机航线规划



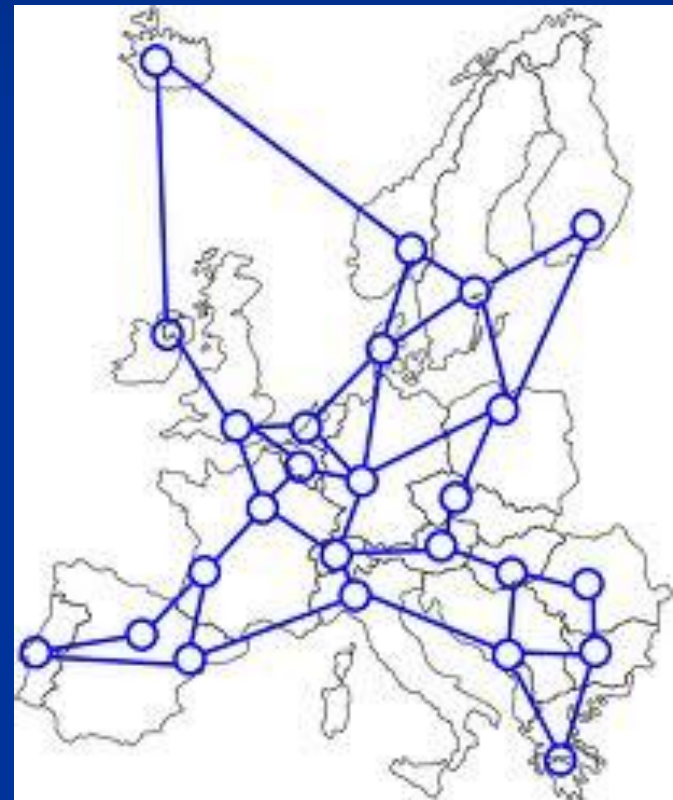
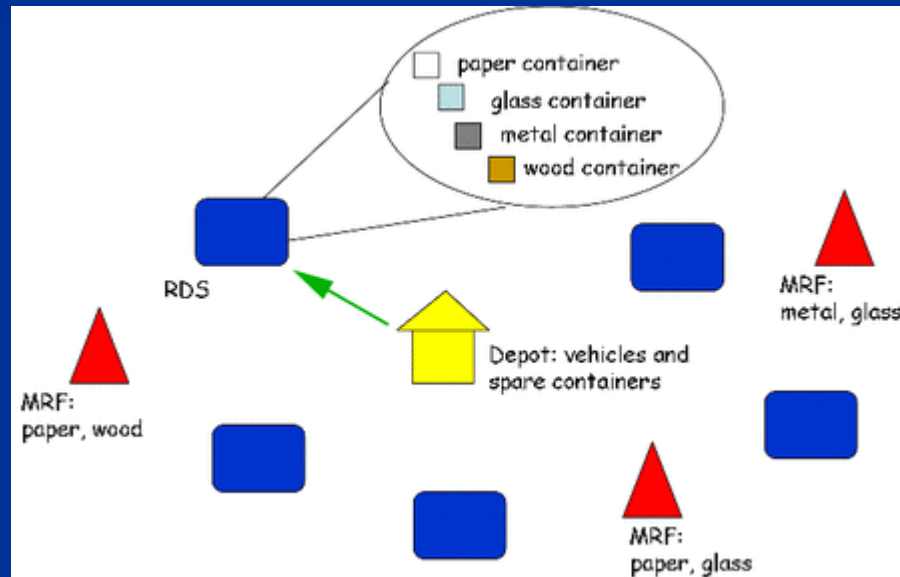
案例3：航空流量疏导



案例4：作业车间调度



案例5：车辆路由



案例6：时刻表与人员排班调度

General Timetable

Teacher Timetable

Room Timetable

Form Timetable

Daywise Timetable

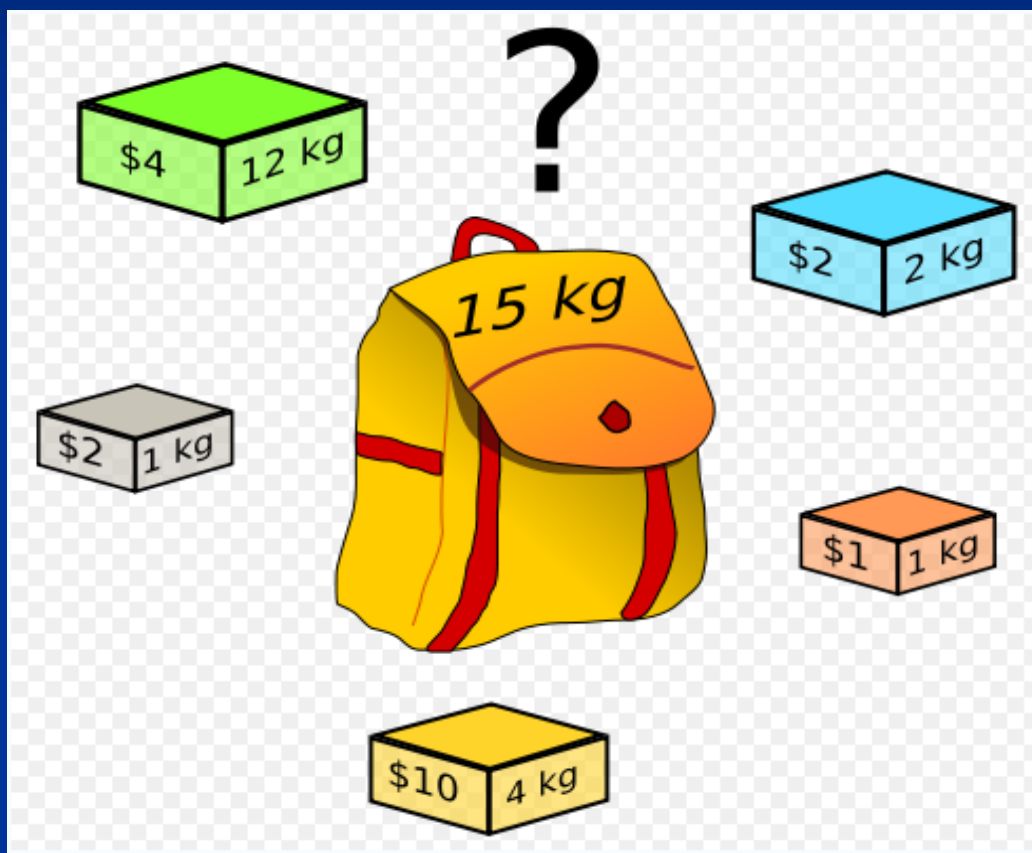
Print

- Recess

Tim

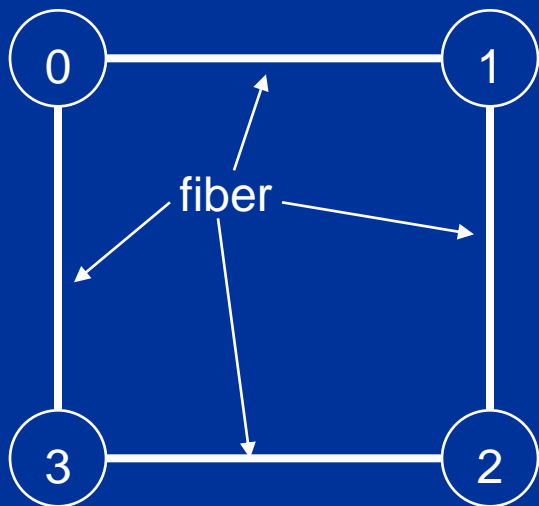
Class	Monday										Tuesday									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T3/3H	-	SJ	SN	KH KHB	KH KHB	KH KHB	BM	MM	BI	-	AG MO	PS	PS	BM	BM	BI	BI	MM	SV	-
T3/3J	-	SN	BI	AG MO	GE	MM	SV	BM	SJ	-	KH KHB	KH KHB	KH KHB	SN	SN	GE	MM	BM	SJ	-
T3/3K	-	PJK	BM	AG MO	SN	SN	BI	GE	MM	-	SV	PJK	BM	PS	PS	SN	SN	BI	MM	-
T3/3N	-	PJK	AG MY	SN	SN	GE	BI	MM	SV	-	BM	MM	AG MO	SN	SN	GE	BI	MM	BM	-
T3/3O	-	SN	SN	BI	BI	MM	GE	-	BM	-	PJK	GE	AG MO	KH KHB	KH KHB	KH KHB	MM	-	BI	-
T3/3S	-	PJK	SV	SN	SN	BM	MM	BI	MM	-	AG MO	BM	SV	SN	SN	MM	BI	SJ	-	-
T3/3T	-	AG MY	PJK	PS	PS	GE	MM	BM	SN	-	BI GE	AG MO	SJ	BM	BM	MM	SV	BI	-	-
T3/A2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T4/4H	-	AG MO	FZ	FZ	BG	BG	AM	BM	MM	SJ	BM	AG MO	KM	KM	PJK	AM	BI	EST	SJ	SJ

案例7：背包问题

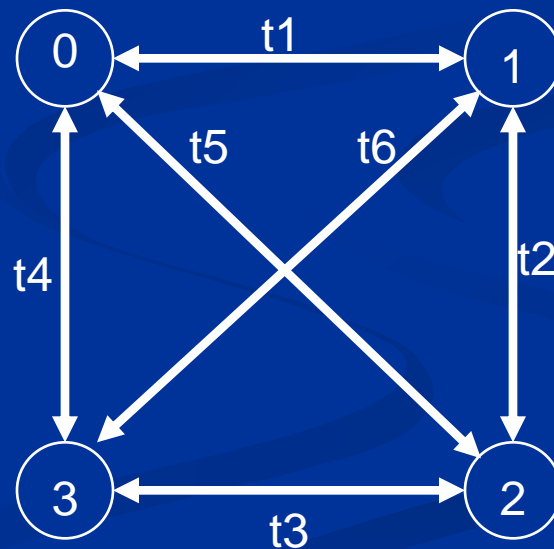


华为光网络规划

- 光网络传送网中的核心优化问题：单次建网的成本约上亿元
- 目标：将低速流量汇聚成高速流量，以减少逻辑网络的边数，即电层设备的数目



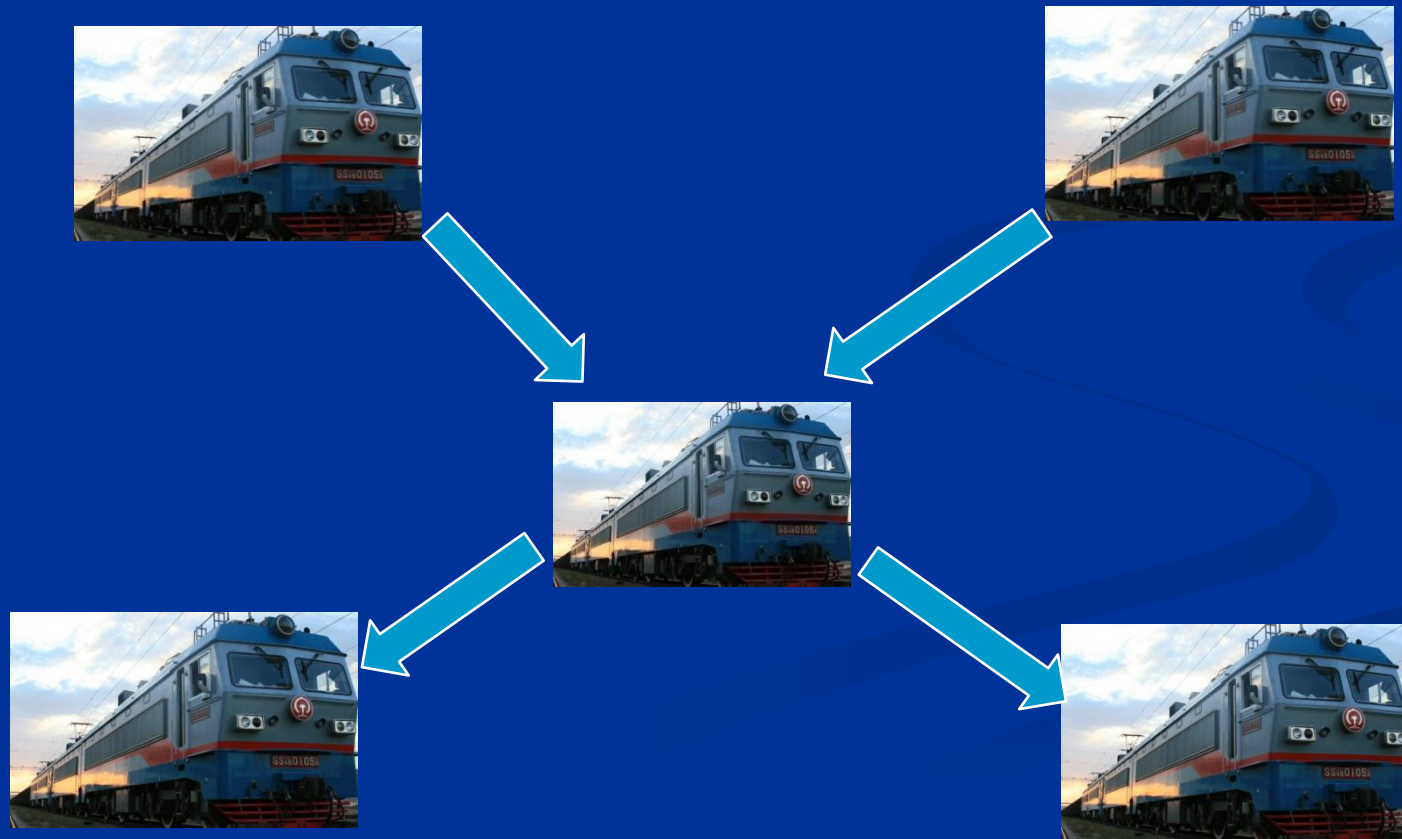
a) 物理网络



b) 业务需求网络

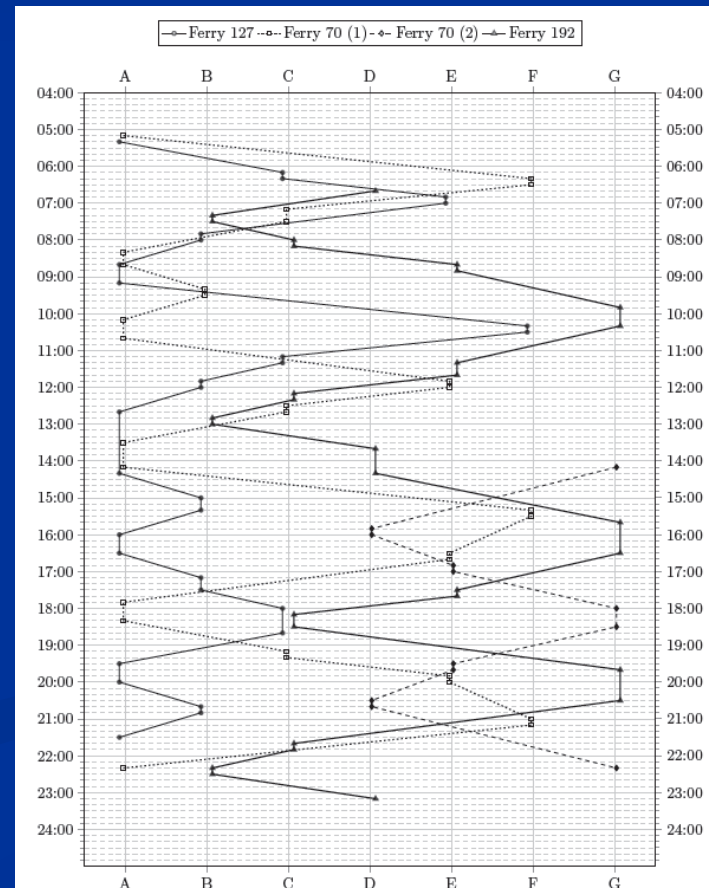
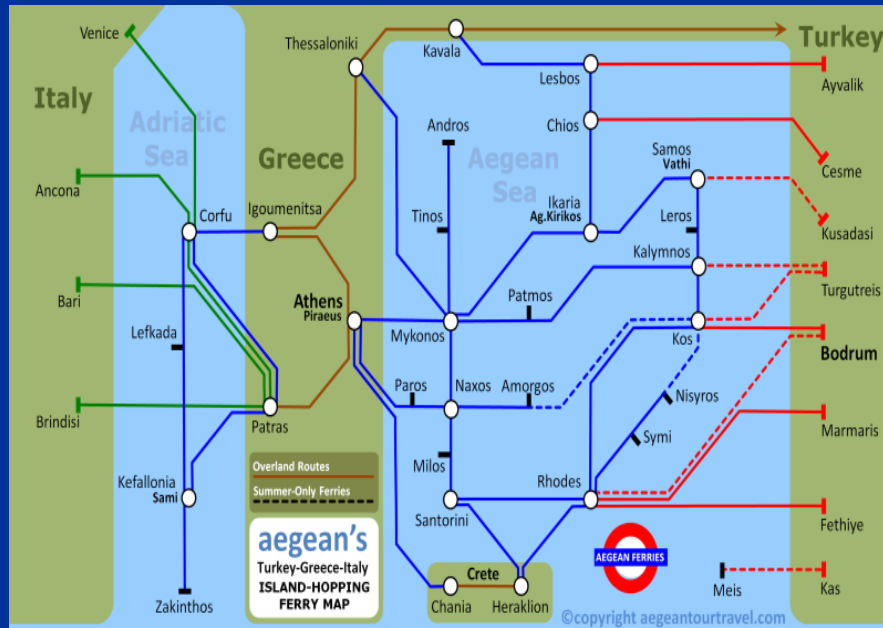
德国铁路网络规划

- 同德国德雷斯顿工业大学合作研究德国铁路网络规划，主要研究如何规划铁路的车次网络，以使在满足运送要求的前提下最小化所投入使用的火车趟数



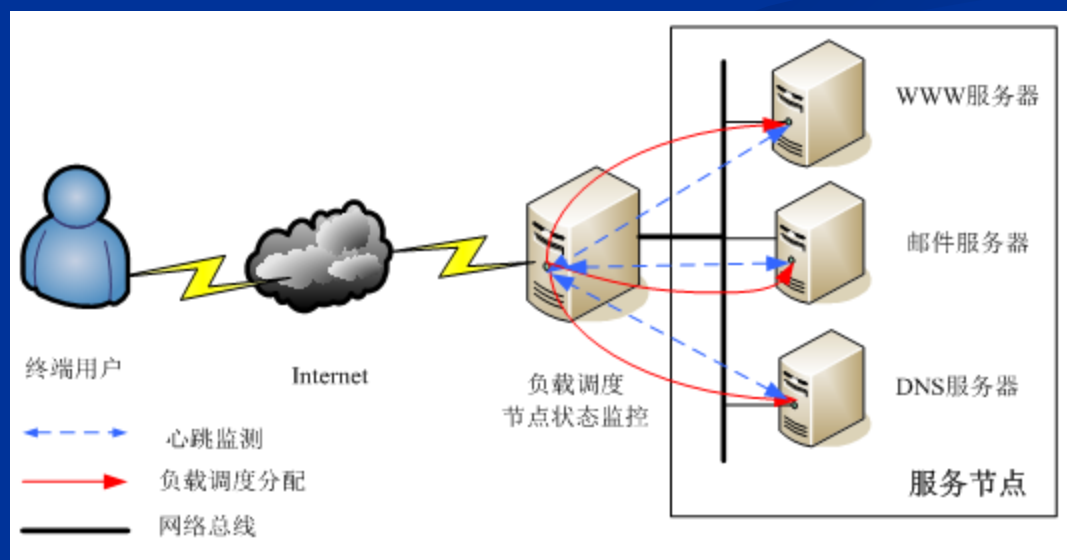
加拿大油轮调度规划

- 与加拿大**Simon Fraser**大学合作研究油轮的路由规划问题，该问题由加拿大最大的船舶公司**BC Ferries**提供



云计算负载均衡

- 云计算负载均衡的核心难题：如何在保证容量、安全性等的前提下实现系统的负载均衡，在代价和优度之间取得好的权衡。
- **Google**、腾讯、网易、百度等网络公司面临的瓶颈难题。



Google EURO 竞赛主题

- 2012 Google: Machine Reassignment (云计算负载均衡)
- 2010 EDF: Production Management (核电站生产调度)
- 2009 AMADEUS: Airline Disruption Management (航空中断管理)
- 2007 France Telecom: Personnel Scheduling (人员排班调度)
- 2005 Renault: Car Sequencing problem (生产车间调度)
- 2003 ONERA: Missions of Earth Observation Satellites (卫星拍照片)
- 2001 CELAR: Frequency Assignment (军事频率分配)
- 1999 Bouygues: Inventory Management Problem (库存管理)

淘汰赛排名

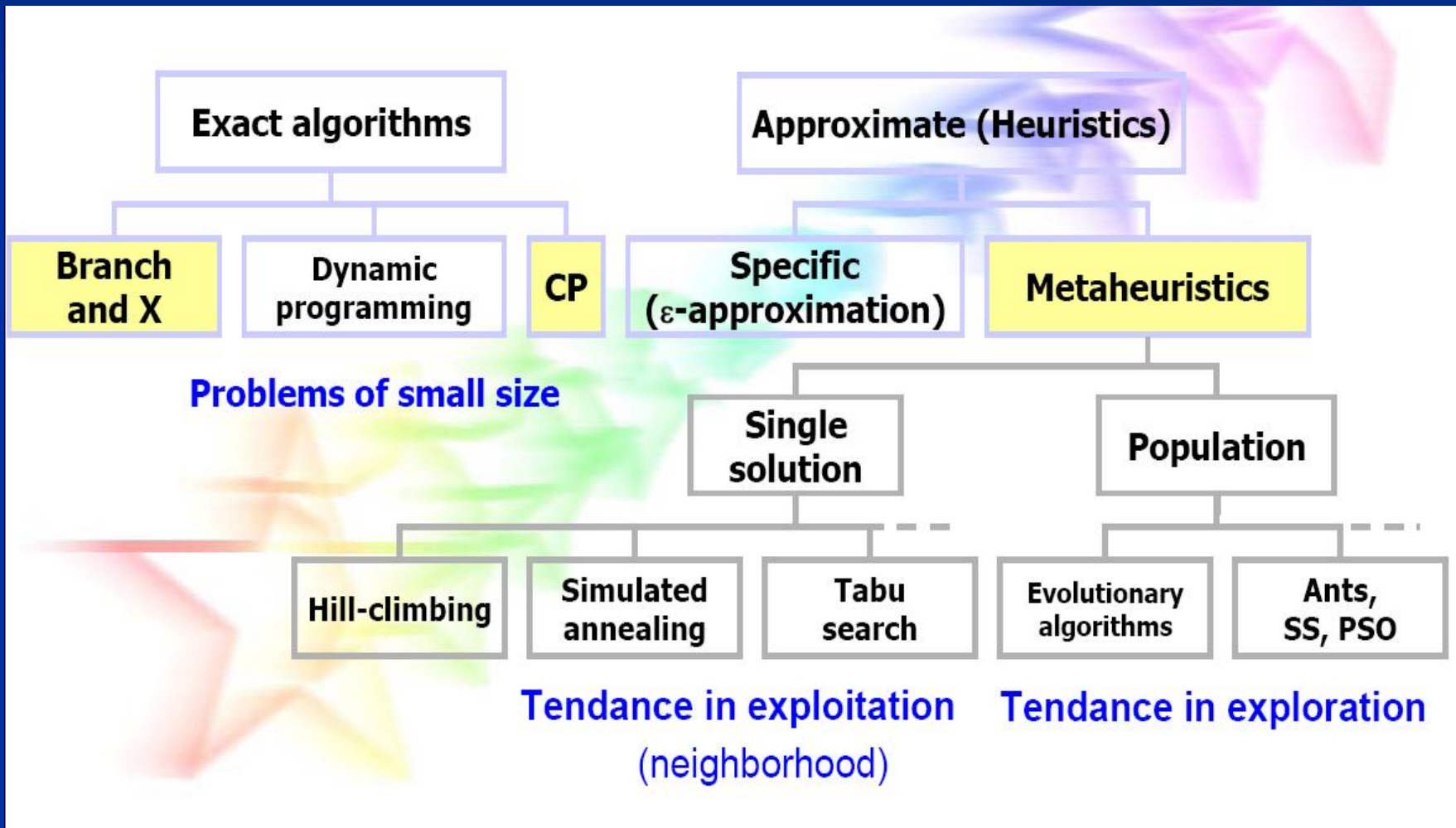
- 全球共有来自26个国家的82支队伍参加了该项竞赛。
- 其中，参赛单位包括麻省理工学院, 微软研究院, 威斯康辛大学麦迪逊分校, 法国科学院CNRS, 加拿大蒙特利尔大学等。
- 在国内，也有来自清华大学, 中国科技大学, 香港中文大学等大学的研究人员参加本次竞赛。
- 根据欧洲运筹学会官网结果显示，在淘汰赛中，我们的成绩在所有82支参赛队伍中排名第9，亚洲第1，是12支亚洲队伍中唯一进入决赛（前30名）的队伍，也是自1999年起历届ROADEF/EURO挑战赛中首次进入决赛的中国研究团队。

航母编队的调度优化

- 在航母的一系列运营和作战过程中，存在大量的智能决策和优化问题，主要涉及对人员，设备，物资，布局等的优化和决策
- 目前实验室正在和北京某军事研究所开展这方面的研究



优化算法分类



精确算法

- 对于上述组合优化问题，可以采用精确算法对其进行求解，如整数线性规划（ILP）算法。但它只能用来求解小规模的问题实例。
- 常用的ILP方法（CPLEX优化软件中均包括）：
 - 1- 分支定界算法
 - 2- 割平面算法
- ILP方法都是基于LP模型的，需要频繁地调用LP的方法。

智能启发式优化算法？

- 传统的精确算法枚举整个搜索空间，但当问题规模较大时就不适用了。
- 所以，现在人们普遍采用“智能”的方式，只搜索很小的有可能包括最优解的那部分区域。
- 如何智能：通过向大自然学习、向人类的社会经验学习，依靠经验和直觉实现真正的“智能搜索”。

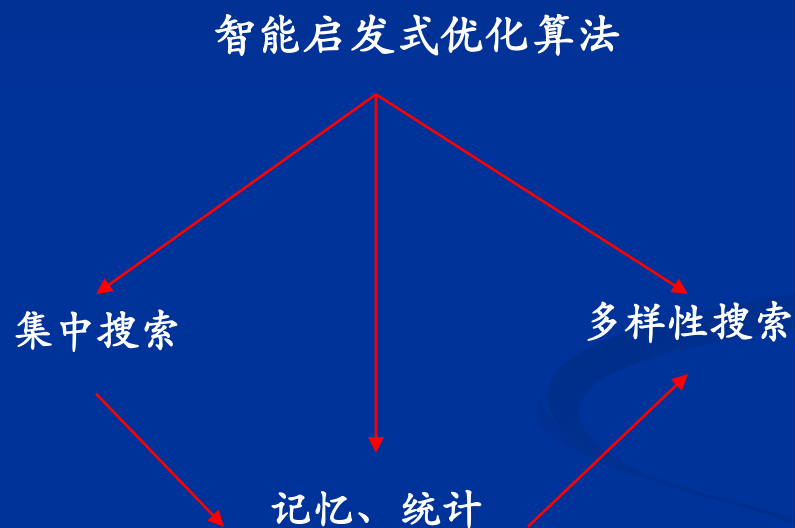
智能启发式算法与精确算法的区别

- 精确算法（逻辑的方法）
 - 优点：精确、严谨
 - 缺点：对稍大规模的实际问题不适用
- 智能启发式算法（自然的方法）
 - 优点：天然、平衡、直觉、权衡，对实际问题有效
 - 缺点：无理论保证

智能启发式算法的分类

- 局部搜索算法: 模拟退火、禁忌算法
- 基于群体的算法: 遗传算法、蚂蚁算法、进化算法
- 混合算法: 局部搜索+进化算法

智能启发式算法总结

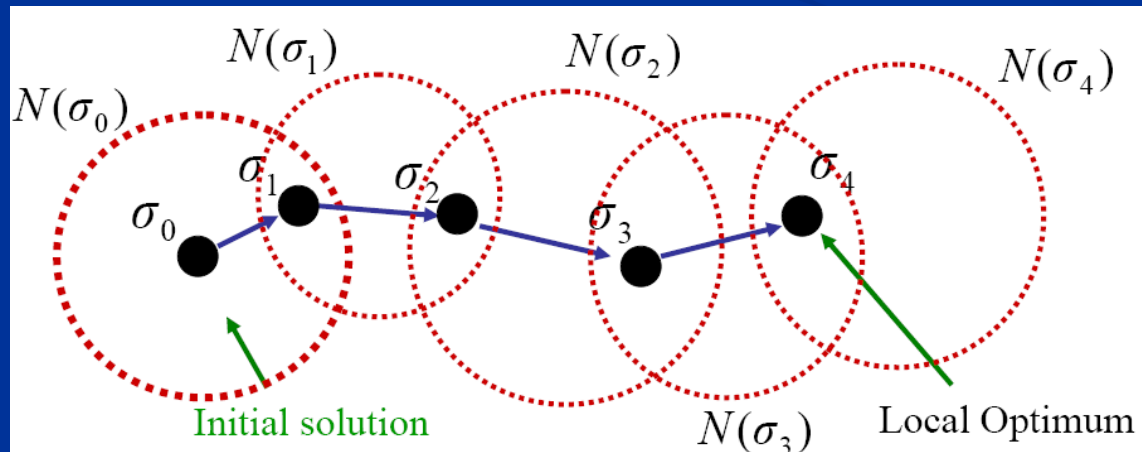


智能启发式优化算法

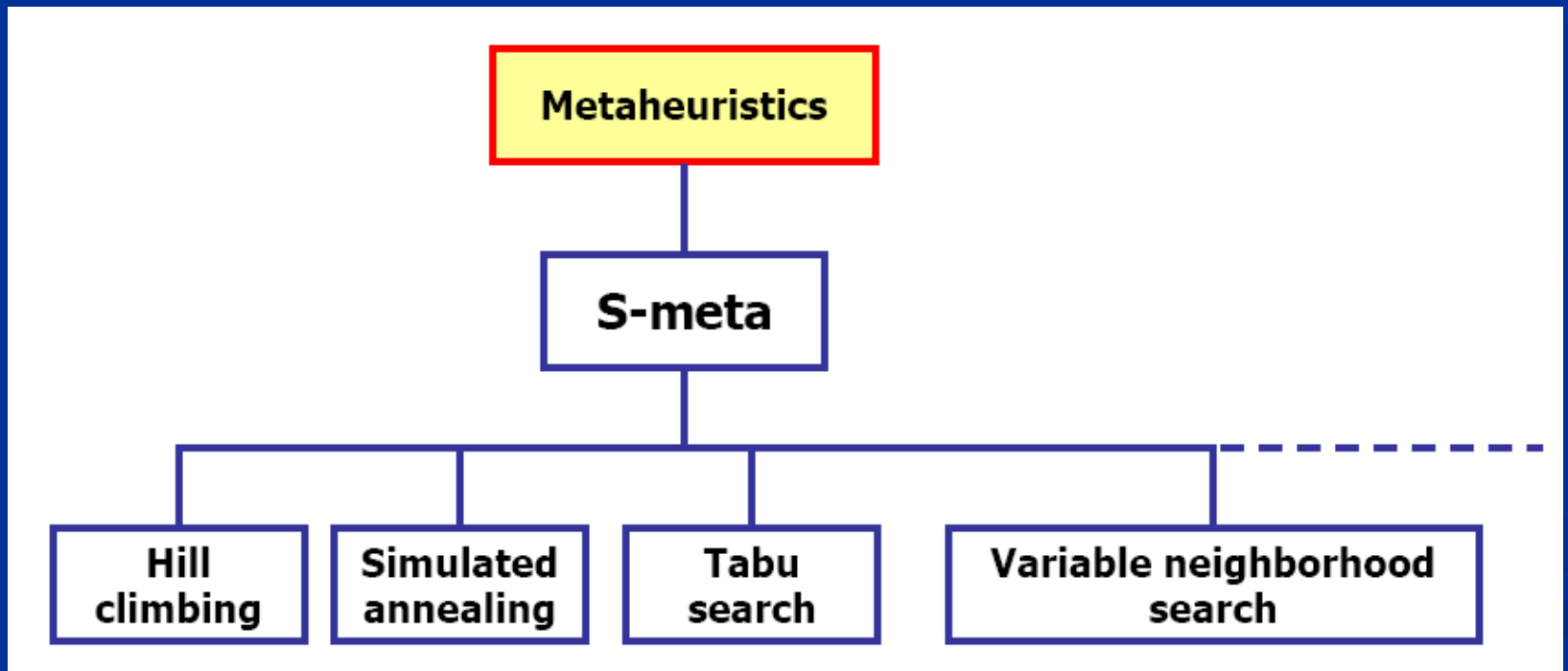
1.基于单个解的元启发式算法

基于单个解的元启发式

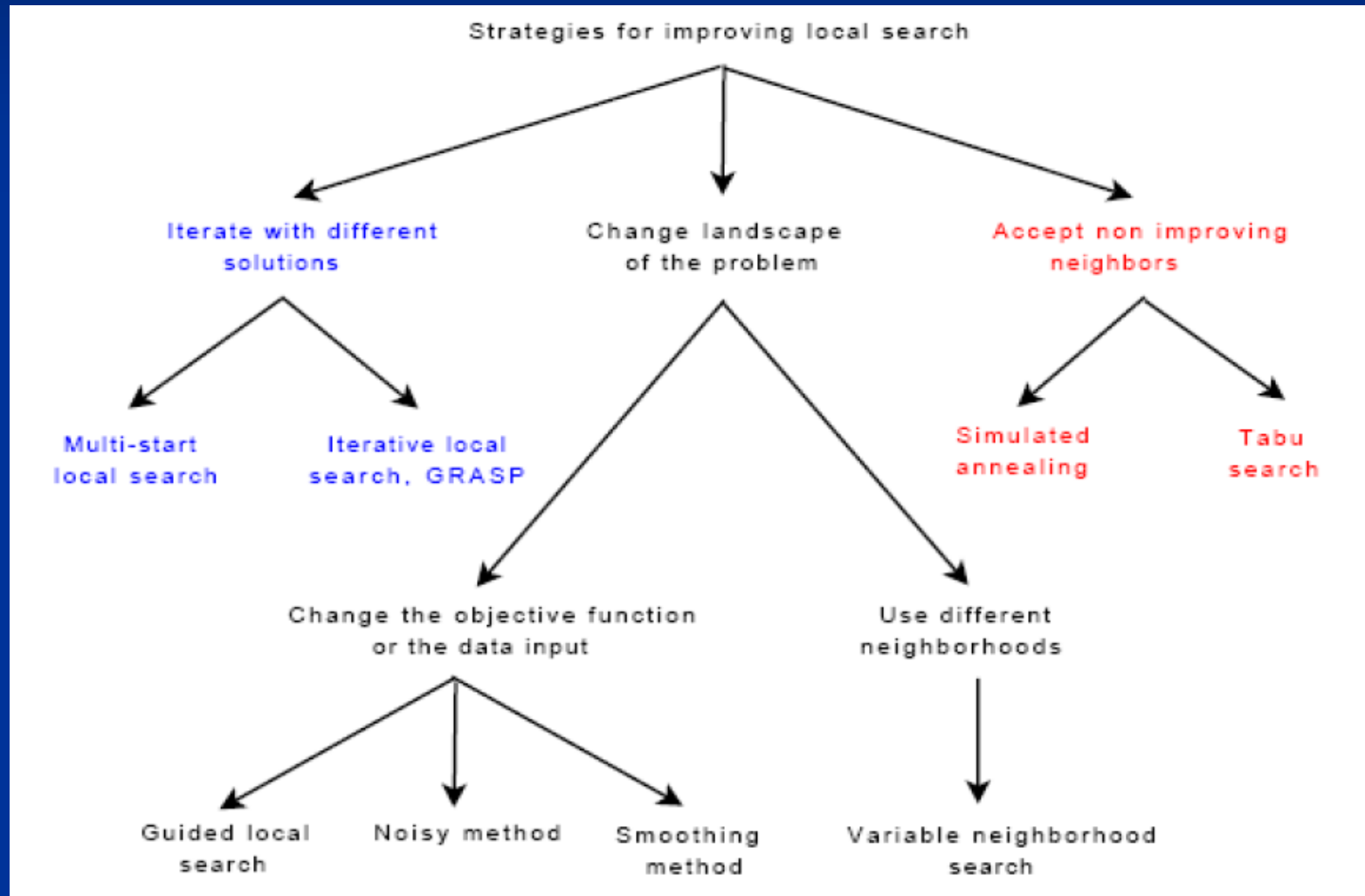
- 对单个解的“改进”，通过在当前解的邻居中不断地搜索更优的解的方式来达到逐渐优化的目的。
- 迭代地搜索领域结构直到找到局部最优解 (集中性搜索)
- 所有的局部搜索算法主要区别于两方面：
 - 邻域的定义 \rightarrow 当前解可以去哪里？
 - 搜索策略 \rightarrow 搜索过程中去哪里？



基于单个解的元启发式分类



跳出局部最优值陷阱的方法



模拟退火算法

- 模拟退火算法允许接受比当前解差的解。
- 每一次随机地选择一个动作，接受该解的概率依据伯尔茨曼分布：

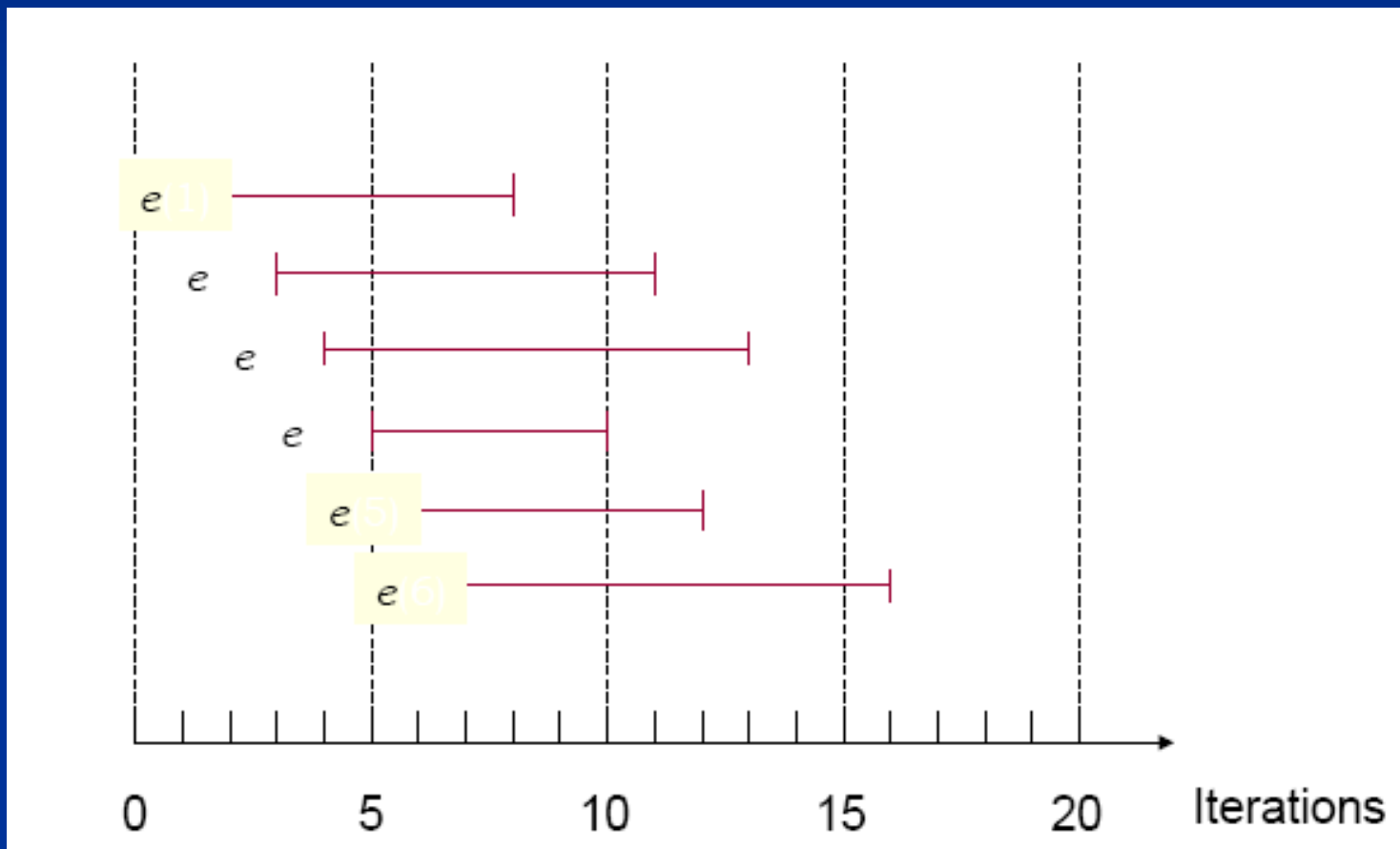
$$P(\Delta E) = e^{\frac{eval(v_n) - eval(v_c)}{T}} = e^{\frac{-\Delta E}{T}}$$

- 温度的作用：
 - T太小：集中性的局部搜索 (搜索末期)
 - T太大：随机搜索 (搜索初期)

禁忌算法

- 由 Fred Glover教授于1986年提出
- 类似于爬山法
- 但是为了跳出局部最优值陷阱，禁忌算法搜索过程中允许接受差的解。
(当整个领域中不存在改进的解的时候)
- 本质上，禁忌算法是一种确定性算法。通过引入“Recency”的记忆装置，禁忌最近做过的动作，来避免算法走回头路，这样就可以达到跳出最优值陷阱的目的。

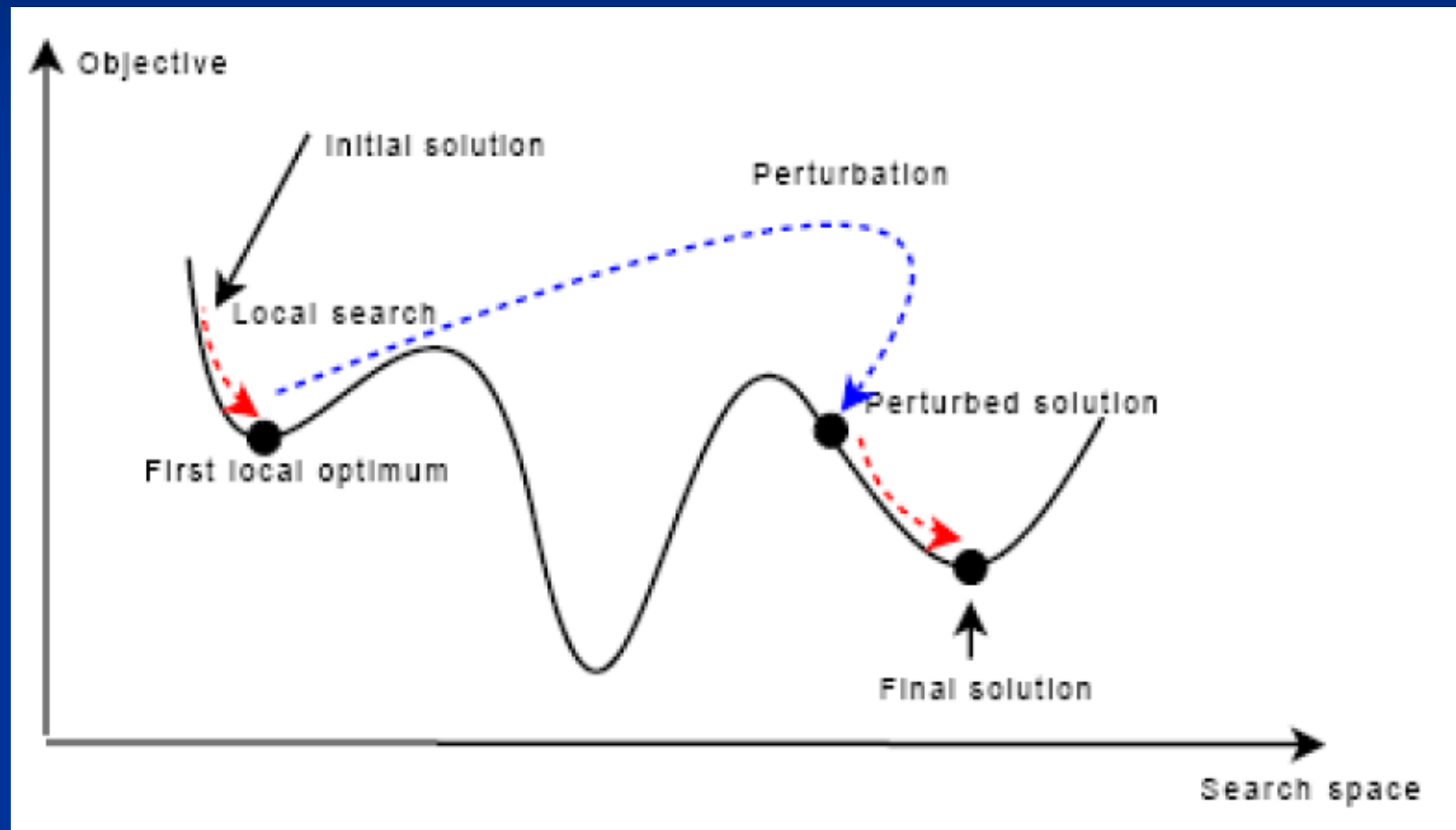
禁忌搜索示意图



迭代局部搜索

- 迭代局部搜索算法的主要思想是：当采用传统的局部算法落入局部最优值陷阱时，采用扰动的思路对历史最优解进行一定程度的扰动，使算法能跳出该局部最优值陷阱。
- 算法在扰动过程中，将原来解的优良性质继承下来，并增加一些随机因素，以增加算法的多样性。
- 局部搜索和扰动的过程迭代进行，直到算法达到某种停机条件。
- 其思想可以概括为“三十六计走为上”。

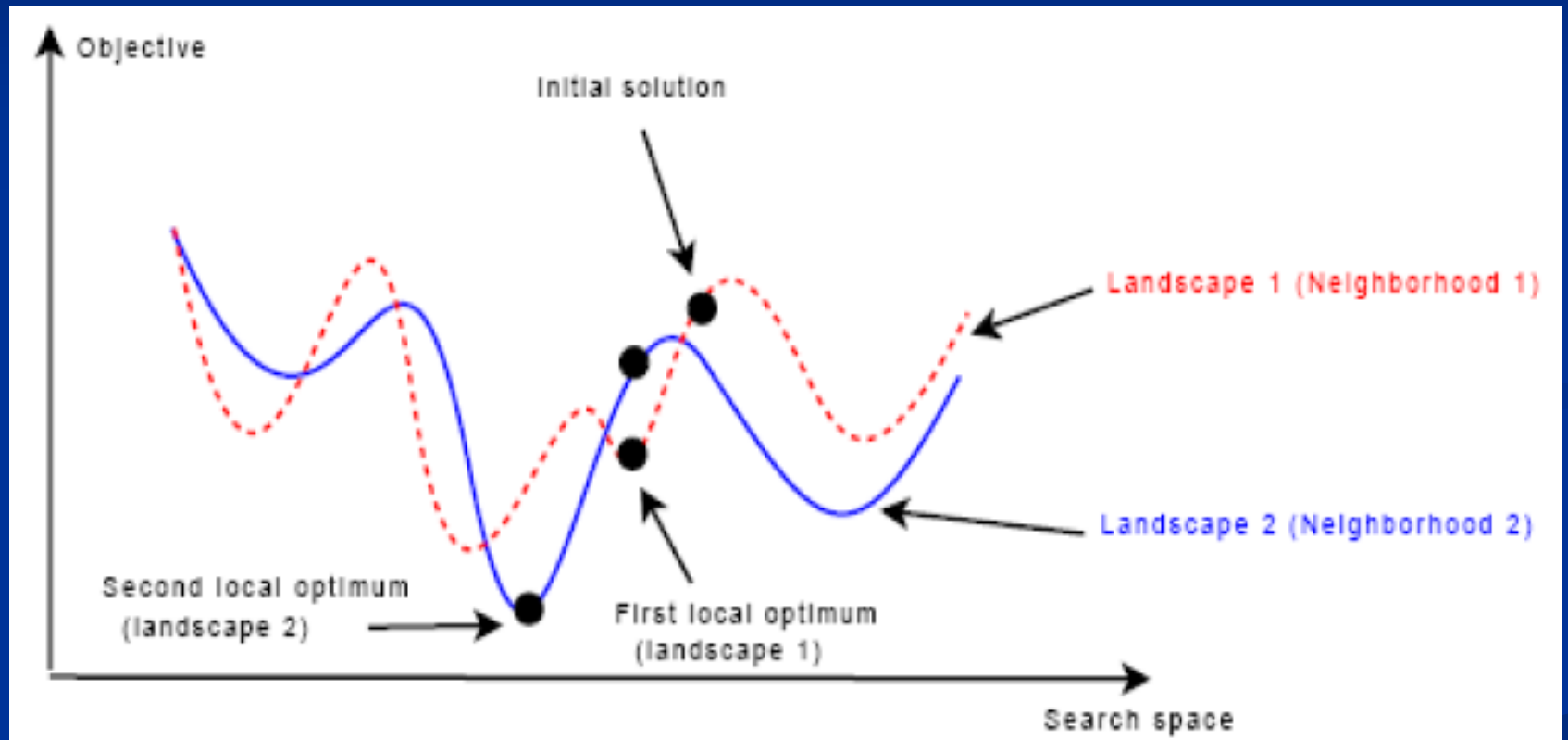
迭代局部搜索



变领域搜索

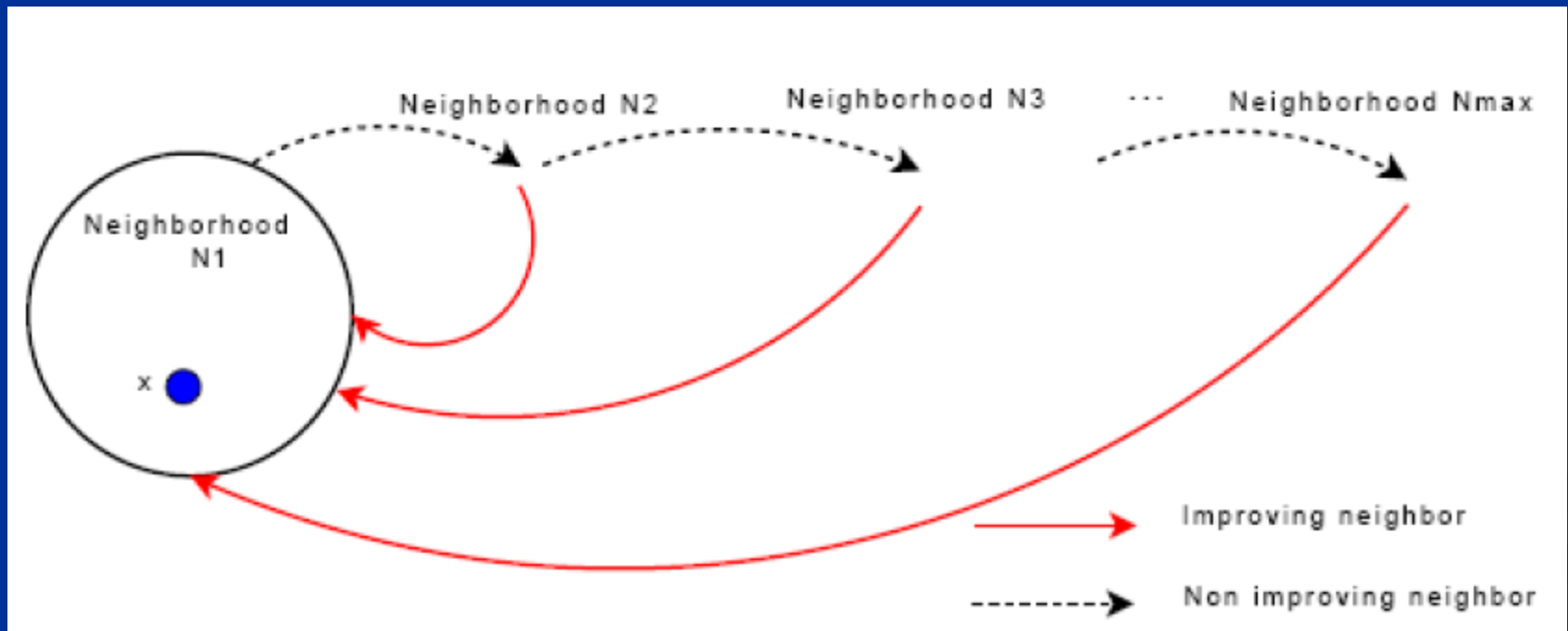
- 变领域搜索算法的主要思想是：采用多个不同的领域进行系统搜索。首先采用最小的领域搜索，当无法改进解时，则切换到稍大一点的领域。如果能继续改进解，则退回到最小的领域，否则则继续切换到更大的领域。
- 变领域搜索的特点是利用不同的动作构成的领域结构进行交替搜索，在集中性和疏散性之间达到很好的平衡。
- 其思想可以概括为“变则通”。

变领域搜索



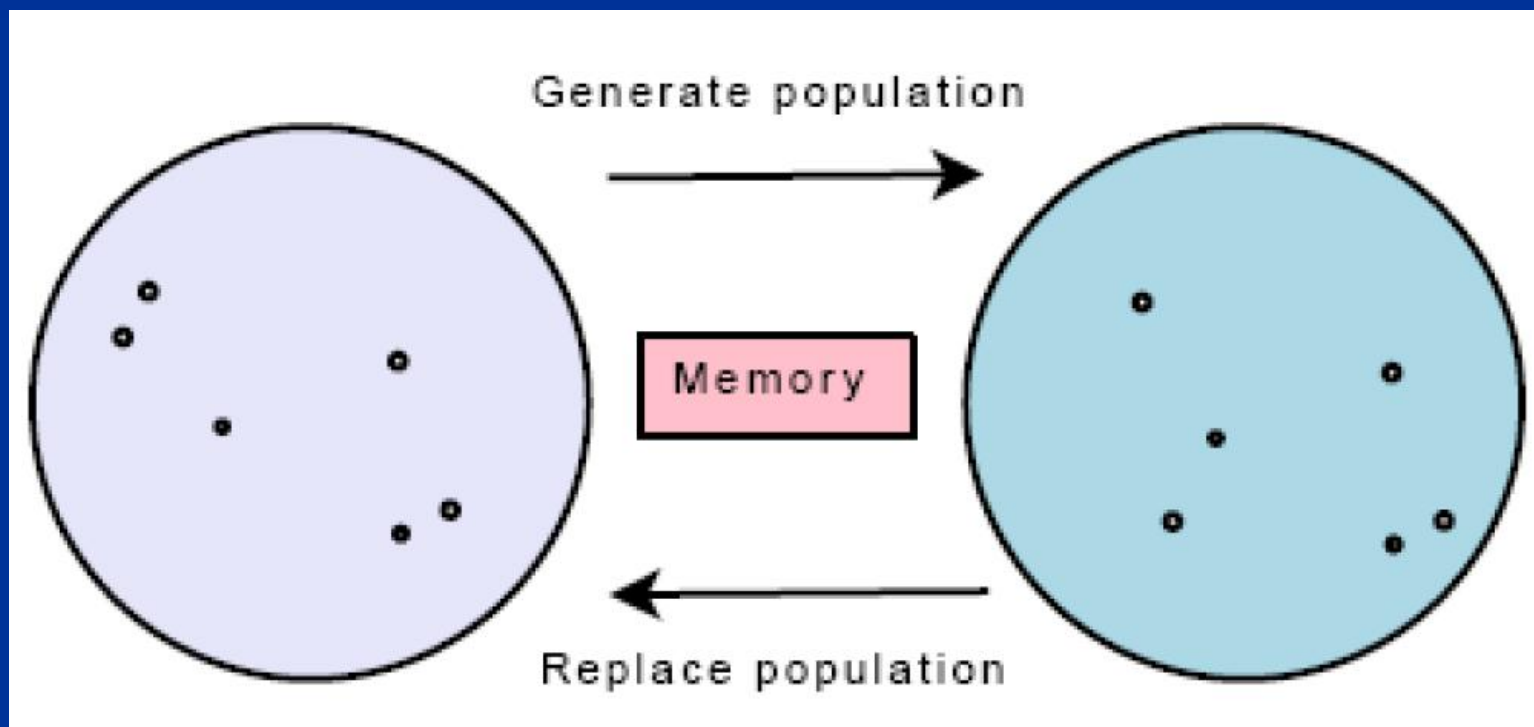
变领域搜索

- 变领域搜索算法停止时，其找到的最优解即为所有领域的局部最优解。

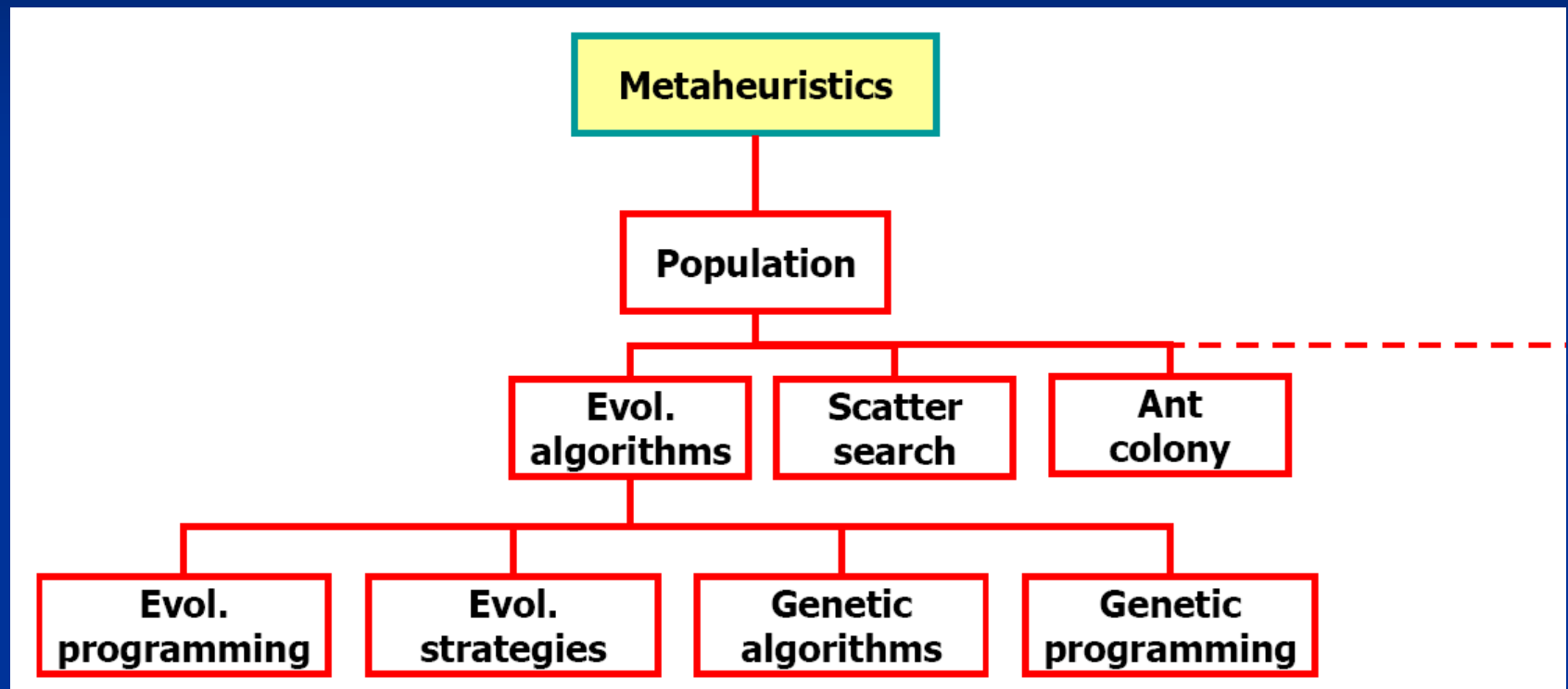


2. 基于群体的启发式算法

基于群体的启发式算法



基于群体的启发式算法分类

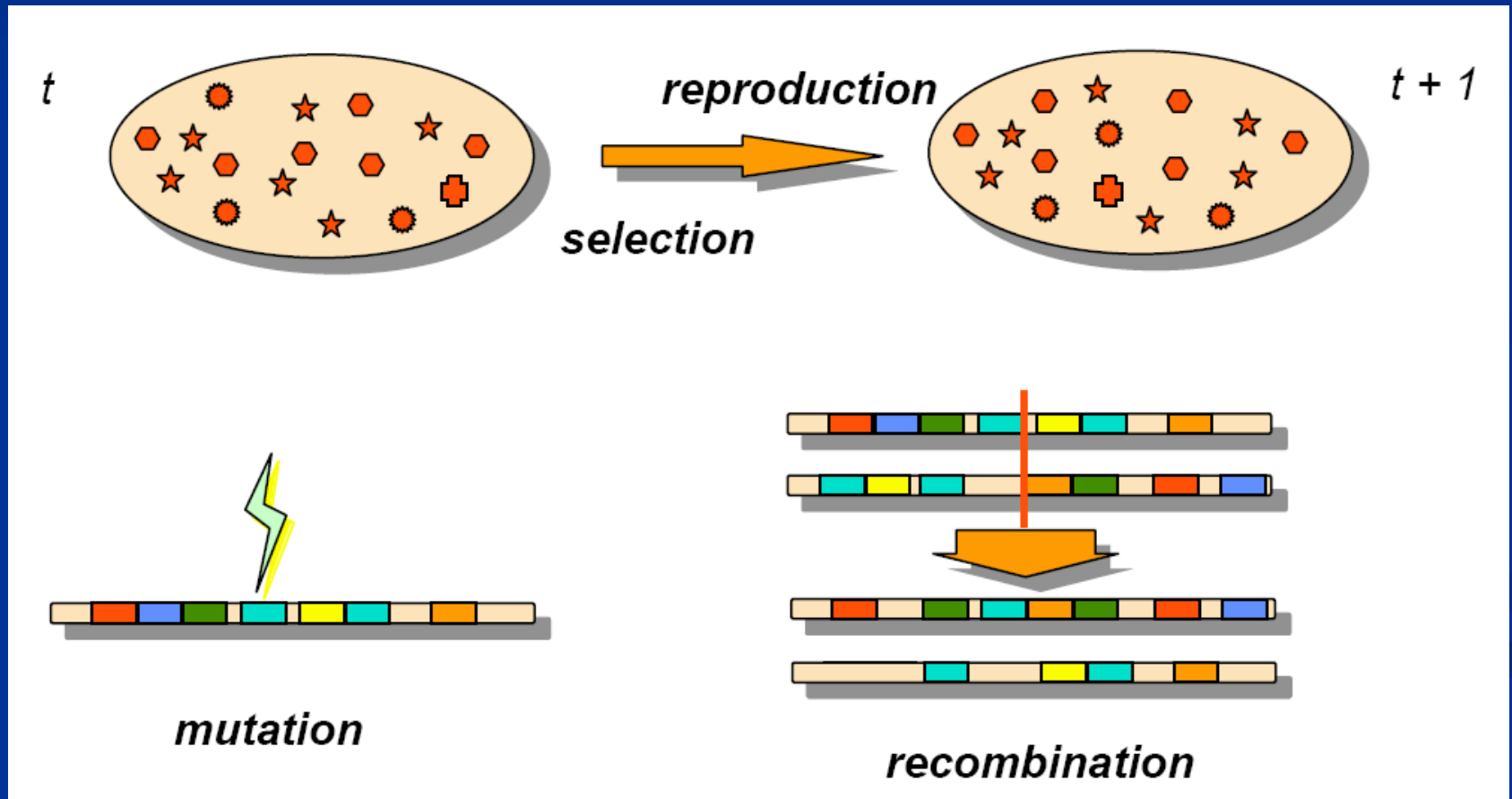


- 基于单个解的元启发式算法主要是“集中性”的搜索
- 基于群体的元启发式算法主要是“疏散性”的搜索

基于群体的启发式算法分类

- 主要通过多个解的合作和信息交互来达到算法“集中性”和“疏散性”之间的平衡。通过几种操作算符产生新解，使群体不断进化和更新，新陈代谢，最终将优秀的个体保存下来。
- 主要的操作算符包括：继承、交叉和变异
- 继承：将优良的个体继承下来
- 交叉：通过将两个解组合，产生质量高的新个体
- 变异：通过对单个解进行扰动，和前面提到的迭代局部搜索算法类似
- 但是，需要注意的是，算法的优劣主要取决于这些算符如何设计。设计的原则是要尽量考虑问题的本质结构，这需要对问题有非常深入地了解。

主要操作



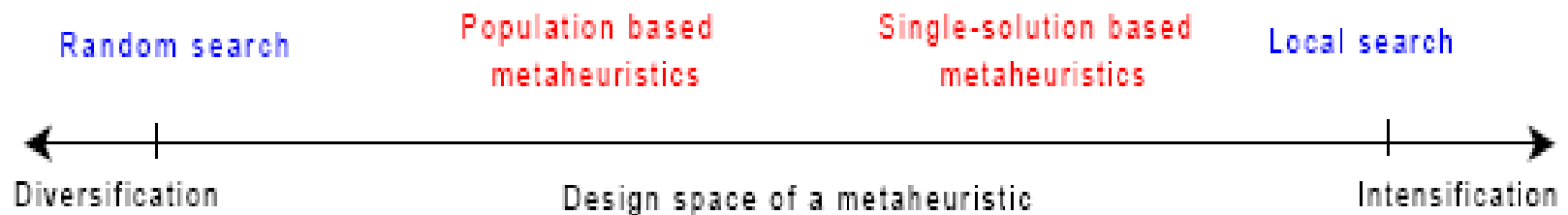
3.混合进化算法

混合进化算法

局部搜索：集中性搜索

群体算法：疏散性搜索

将局部搜索算法与群体算法结合的方法叫做“混合进化算法”，它可以达到更好的“集中性”和“疏散性”之间的平衡。



混合进化算法

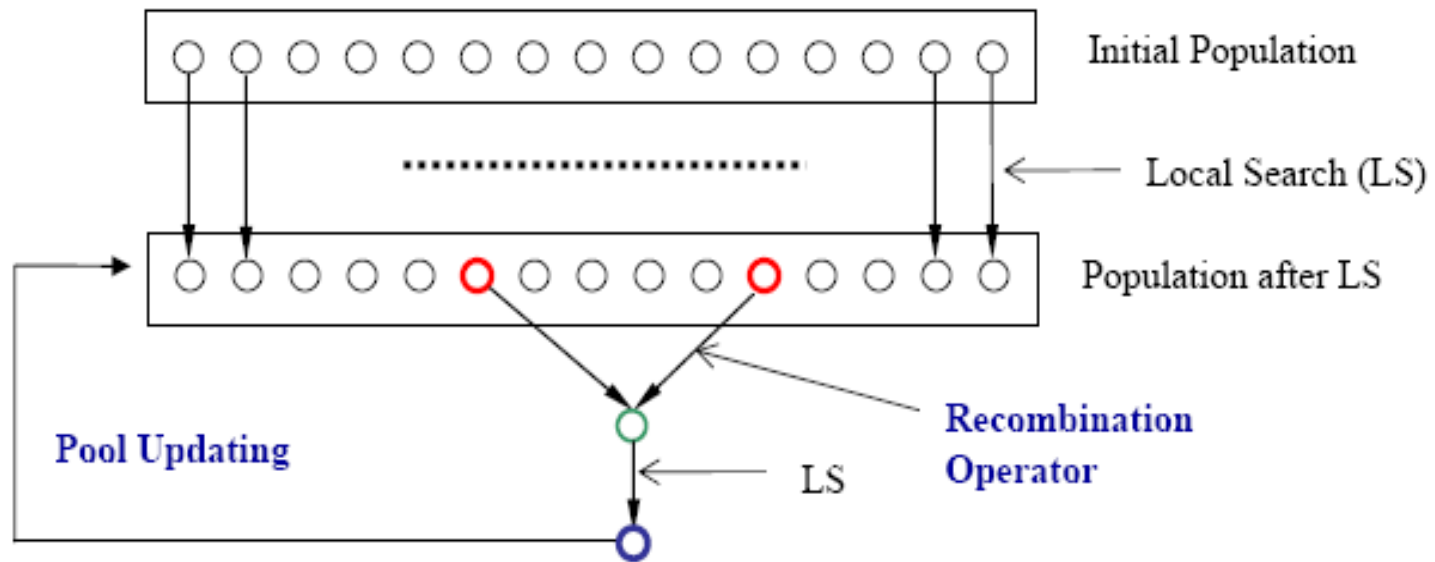
其主要思想是：维护一个比较小的“精英”群体，每个解都是经过局部搜索算法优化过的。对群体中的解采用进化算法的操作对其进行变换，并采用局部搜索算法对其优化。

当产生新解后，需要以解的优度和群体的多样性等指标为依据，来对群体进行更新。

与进化算法相比，混合进化算法中的群体更新策略更重要。

混合进化算法往往表现出比单纯的局部搜索或进化算法更优越的搜索性能。

混合进化算法



Hybrid Evolutionary Algorithm (LS+EA)

谢谢大家！