

# 和声搜索算法改进与应用

周雅兰 黄 韬

(广东财经大学信息学院 广州 510320)

**摘 要** 和声搜索算法是最近出现的一种模拟音乐演奏过程的全局搜索元启发式算法,目前已经有许多改进版本,并被大量用于优化和工程实践问题中。首先描述了原始和声搜索算法的特点和流程,然后对和声搜索算法繁多的变种及其应用领域进行了梳理和分类,最后指出和声搜索算法的未来研究方向。

**关键词** 和声搜索,改进,混合,应用

中图法分类号 TP18 文献标识码 A

## Modifications and Applications of Harmony Search Algorithm

ZHOU Ya-lan HUANG Tao

(School of Informatics, Guangdong University of Finance and Economics, Guangzhou 510320, China)

**Abstract** Harmony search (HS) algorithm mimicking the improvisation process of music players is a new metaheuristic approach for global optimization. Many researchers have proposed lots of modified versions of the original HS and applied them to a wide range of optimization problems. Firstly, the original HS is introduced. Secondly, these variants of HS algorithms and their applications are reviewed. Finally some future research lines are given.

**Keywords** Harmony search, Modification, Hybrid, Application

优化问题无处不在,近年来,涌现了不少以解决复杂优化问题为目的的元启发式算法。这类算法大多来源于模拟自然界中的某一现象,特点是通用性强、简单灵活、容易设计和实现,受到了大量研究者的关注。2001年 Geem 等人提出了一种新的元启发式算法,称为和声搜索(Harmony Search, HS)算法<sup>[1]</sup>,该算法模拟即兴音乐演奏过程,演奏者即兴调整乐器的音调,目标是演奏出优美的和声。虽然优美和声的衡量是主观的,但是早在公元前五百年希腊哲学家和数学家 Pythagoras 就算出了频率比率,并且在研究什么标志优美和声之后,发现了它们之间存在特殊的数学关联<sup>[2]</sup>。18世纪的法国作曲家 Jean-Philippe Rameau 在《和声理论》一书中建立的古典和声理论,仍然构成现代音高和声学习的基础<sup>[2]</sup>。这种演奏过程中不断调整音调达到最优美和声的过程能与优化问题中搜索最优解的过程建立联系,且和声搜索算法既能用于连续优化问题也能用于离散优化问题,因此引起不少研究者的注意,已有很多改进的方法被提出并成功应用于许多优化和工程实践问题中。

本文第 1 节介绍原始 HS 算法,第 2 节对改进的 HS 算法进行分类,第 3 节对 HS 算法的应用进行分类,最后总结全文并给出未来的研究方向。

### 1 原始和声搜索算法

优化问题定义为,最小化或最大化  $f(X)$ , 约束条件为

$g(x) \geq 0, h(x) = 0, x_i \in \Omega_i, i = 1, 2, \dots, n$ , 其中  $f(X)$  是目标函数,  $X$  是包含  $n$  个决策变量  $(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$  的一个解向量, 决策变量的值可以是连续的也可以是离散的,  $\Omega_i$  是决策变量  $x_i$  的解空间, 如果  $x_i$  是离散变量值, 那么  $\Omega_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k), \dots, x_i(K_i)\}$ 。

Geem 提出的原始 HS 算法的步骤如下<sup>[1,2]</sup>:

**第 1 步 初始化参数。** HS 算法需要初始化的参数有: 和声库大小(Harmony memory size, HMS)、学习和声库的概率(HM consideration rate, HMCR)、音调调整率(Pitch-adjusting rate, PAR)、距离带宽(Bandwith, BW)和创作的次数,这五个参数依次对应元启发式算法中的种群大小、从当前种群中选择解的概率、变异概率、变异步长和终止条件。

**第 2 步 初始化和声库,** 对应元启发式算法中的初始化种群。在解空间  $\Omega_i$  范围内随机生成 HMS 个和声(解或个体), 这些随机产生的解和对应的目标函数值存储在种群中。通常为了让算法有更好的初始 HM, 初始产生的随机解数目大于 HMS, 然后选择目标函数值好的 HMS 个解放在种群中。用矩阵表示为,

$$HM = \begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^{HMS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_n^1 & | & f(X^1) \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_n^2 & | & f(X^2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & | & \vdots \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_n^{HMS} & | & f(X^{HMS}) \end{bmatrix}$$

在该矩阵中, 每一行代表一个解。

本文受国家自然科学基金项目(60905038), 广州市珠江科技新星专项(2012J2200085), 广东商学院科研创新团队建设计划资助。

周雅兰(1979-) 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为人工智能与数据挖掘, E-mail: zhouylan@163.com; 黄 韬(1989-) 男, 硕士生, 主要研究方向为人工智能。



第3步 产生新和声,对应元启发式算法中的产生新解。新解  $X^{new} = (x_1^{new}, x_2^{new}, \dots, x_i^{new}, \dots, x_n^{new})$  通过3种操作产生: ①学习和声库; ②调整音调; ③随机选择。这3种操作分别对应元启发式算法的从当前种群中选择解、第一次变异和第二次变异。具体用公式表示为:

$$x_i^{new} = \begin{cases} x_i^{U(1,HMS)}, & \text{if } rand() \leq HMCR \\ x_i \in \Omega_i, & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中,  $x_i^{U(1,HMS)}$  表示从种群的第  $i$  列随机选择一个音调(决策变量);  $x_i \in \Omega_i$  表示在第  $i$  列的解空间内随机取值,也即第二次变异,可以看出第二次变异的概率是  $1 - HMCR$ ;  $rand()$  是  $[0,1]$  区间均匀分布的随机数。如果  $x_i^{new}$  是从当前种群中选择的,还要以一定概率调整音调,也即第一次变异。如果决策变量是连续值,第一次变异用公式表示为:

$$x_i^{new} = \begin{cases} x_i^{new} + rand() \times BW, & \text{if } rand() < PAR \\ x_i^{new}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

如果决策变量是离散值,第一次变异用公式表示为<sup>[3,4]</sup>:

$$x_i^{new} = \begin{cases} x_i(k+m), & \text{if } rand() < PAR \\ x_i(k), & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中,  $x_i(k) \in \Omega_i$ ,  $x_i(k+m)$  表示与  $x_i(k)$  邻近的值,  $m \in \{\dots, -2, -1, 1, 2, \dots\}$ 。

第4步 更新和声库,对应元启发式算法中的更新种群。采用稳态选择操作更新,即如果新解  $X^{new}$  比 HM 中最差的解具有更好的目标函数值,那么新解加入到 HM 中,而最差的解在 HM 中被删除。同时,为了防止算法早熟收敛,规定 HM 中相同解数目不能超过一定数量,即  $n(x^{new} = x^j, j \in \{1, 2, \dots, HMS\}) < MaxVec$ , 其中  $n(\cdot)$  是计算在 HM 中相同解个数的函数,  $MaxVec$  是 HM 中相同解的最大数量。

第5步 判断是否达到终止条件。重复第3-5步,直到满足给定的终止条件。终止条件一般有3种:达到指定最大迭代次数;达到指定最大执行时间;在给定的迭代次数内,目标函数值的变化量小于某个范围。

图1是按照元启发式算法的定义画出的原始 HS 算法的流程图。

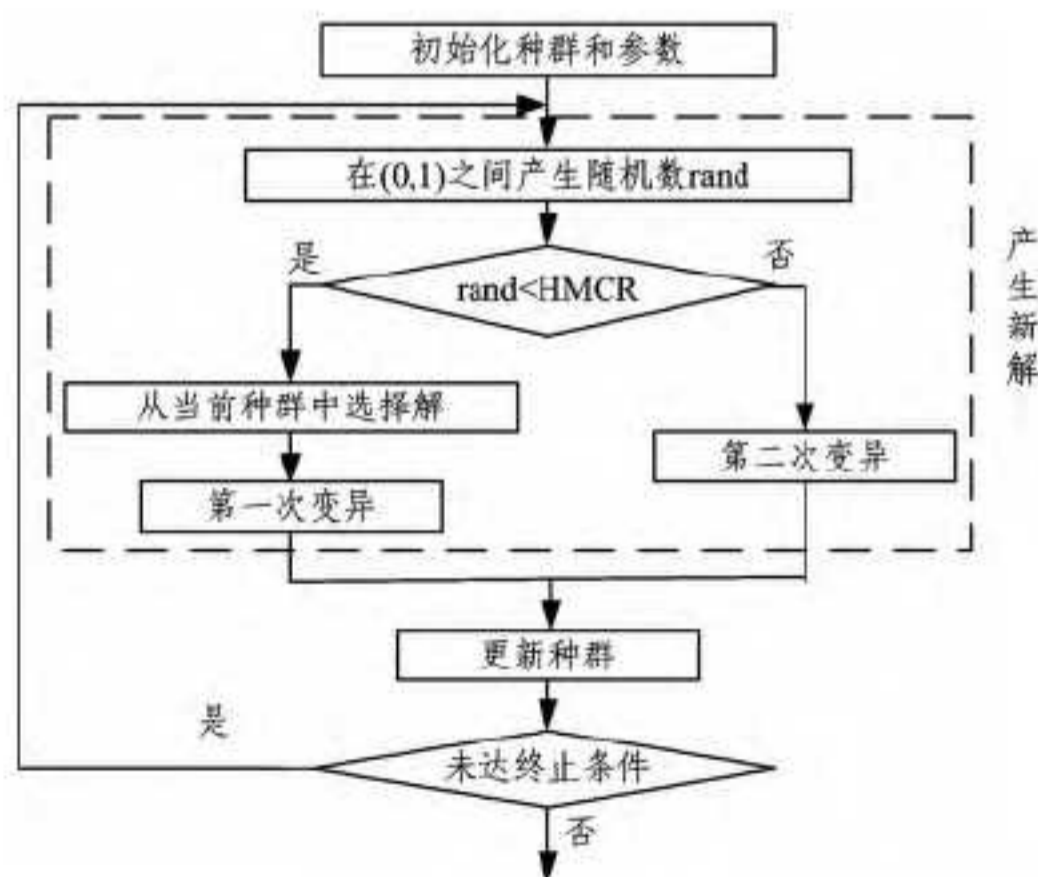


图1 原始和声搜索算法的流程图

后来,HS 算法的提出者 Geem 又提出在第3步产生新解后,再进行两种操作处理:集成和惩罚<sup>[3,4]</sup>。

## 2 改进和声搜索算法的分类

HS 算法被提出后,很多研究者致力于研究提高 HS 算法

的性能并扩展其应用领域。目前已经有大量 HS 算法变种,本文将这些 HS 算法分为两大类:改进自身操作和与其他算法混合。图2是对这些 HS 算法的分类。

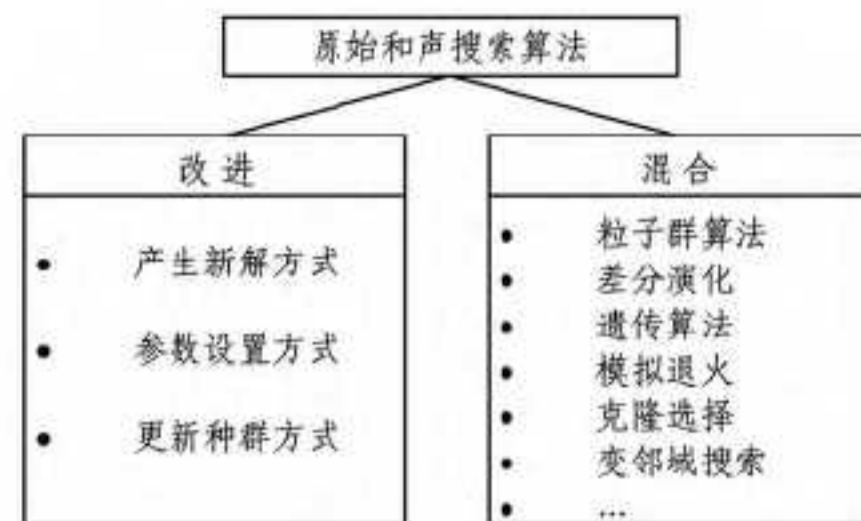


图2 和声搜索算法的分类

### 2.1 改进和声搜索算法

#### 2.1.1 产生新解方式的改进

新解通过3种操作产生: ①从当前种群中选择解; ②第1次小概率变异; ③第2次随机变异。对产生新解方式的改进,主要就是对这3种操作的改进。

较为著名的改进是 Mahdavi 等人<sup>[5]</sup>受粒子群优化算法思想启发,于2008年提出的 GHS(Global-best HS)。GHS 把产生新解的第2种操作即第1次小概率变异,改为直接继承 HM 中最优解的相关决策变量。文献<sup>[6]</sup>对 GHS 进一步改进,当  $rand() < PAR$  时,其不同于 GHS 随机选择全局最优解的任意决策变量,而是选择对应位置的决策变量。此外,为了避免陷入局部最优解,对第1种操作即从当前种群中选择解进行了小的扰动。同样,在文献<sup>[7-9]</sup>中将 HS 产生新解的第2种操作,改为差分进化算法的变异操作。

文献<sup>[10]</sup>对从当前种群中选择解的操作使用了3种选择机制:随机选择、学习种群中最优解和适者生存。实验结果显示采用适者生存机制的 HS 算法能获得更好的解。这表明 HS 算法的性能受第1种操作中的选择机制影响,因此可以考虑在第1种操作中引入更多的选择机制,如:波兹曼选择、竞标选择、排序选择、稳态选择。

文献<sup>[11-13]</sup>提出一个新的全局 HS 算法,提出的算法包含两个重要的操作:位置更新和小概率的遗传变异,前者使 HS 算法快速移向全局最优解,后者避免算法因快速移动造成的早熟收敛。

#### 2.1.2 参数设置方式的改进

对参数的改进工作比较多。HS 算法中最主要的参数有3个:HMCR、PAR 和 BW。

Mahdavi 等人<sup>[14]</sup>于2007年提出的 IHS(Improved HS)是对 HS 算法参数改进中最著名的算法,后来的很多改进算法与该算法进行了性能比较。IHS 中 PAR 和 BW 两个参数在各自预定的最大值和最小值之间动态变化,PAR 随着迭代次数线性增加,BW 随着迭代次数指数下降。

潘全科等人<sup>[15]</sup>提出 PAR 和  $BW_{max}$  ( $BW_{min}$  固定为  $10^{-4}$ ) 配对的参数集合表,HS 算法运行时自适应地从参数集合表中选择参数。后来他们又提出参数 HMCR 和 PAR 通过一个学习机制自适应调整,BW 动态下降<sup>[6]</sup>。

高利群等人<sup>[16]</sup>利用种群中函数最大差值来调节 PAR 和 BW,提出了自适应 HS 算法。

也有研究者只改进其中一个参数,如 Majid 等人只改进



BW 参数设置的方式<sup>[17,18]</sup>。

### 2.1.3 更新种群方式的改进

原始 HS 算法每次只更新 HM 中的一个解, HM 中的信息更新慢。刘三阳等人<sup>[19]</sup>先将整个 HM 分解成若干个独立的子种群, 每个子种群既执行独立的局部搜索, 又通过互相交换和通信实现随机重组, 加快了信息的流动。

Gao 等人<sup>[20]</sup>提出能存入 HM 的新解必须满足 3 个条件:

- 1) 比 HM 中最差解要好;
- 2) HM 中相似解的数目少于指定值;
- 3) 适应度值比相似解的平均适应度值要好。

文献<sup>[11-13]</sup>中更新 HM 时, 即使新产生的解比 HS 算法中最差解还要差, 也替换掉 HM 中原来的最差解。

## 2.2 混合和声搜索算法

根据无免费午餐定理, 没有一种算法能够在所有问题上优于所有其他算法, 混合算法是提高算法性能的一个重要手段。

混合 HS 算法有两种方法<sup>[21]</sup>, 一种在 HS 算法中引入其他元启发式算法的组件; 另一种是将 HS 算法的组件引入到其他元启发式算法中。

### 2.2.1 在和声搜索算法中引入其他组件

前面提到的 GHS 是在 HS 算法中引入粒子群优化的组件<sup>[5,6]</sup>。同样, Geem 也在 HS 算法引入粒子群优化个体最好解的概念, 从当前种群中选择最好解的决策变量作为新解<sup>[22]</sup>。文献<sup>[7-9]</sup>引入差分演化算法的组件替代 HS 算法中的第一次小概率变异操作。Gao 等人<sup>[20]</sup>使用差分演化来精细调整种群中的解向量, 并使用新的种群更新方式。文献<sup>[10]</sup>在 HS 中引入遗传算法的轮盘赌选择方法。Taherinejad<sup>[23]</sup>引入了模拟退火的冷却机制来调节 PAR 参数。Liu 等人<sup>[24]</sup>在 HS 中引入变邻域搜索来保持全局探索和局部开采的平衡。Wang 等人<sup>[25]</sup>引入克隆选择算法来改进 HS 算法的收敛能力。郝冰等人<sup>[26]</sup>引入分布估计算法对整个和声库进行统计抽样, 增强了 HS 算法的全局搜索能力。刘三阳等人<sup>[19]</sup>在 HS 算法中引入蛙跳算法进行局部搜索。Lee 和 Zonaya<sup>[27]</sup>同时引入遗传算法、模拟退火和人工免疫 3 种元启发式算法来提高 HM 中解的收敛速度, 并阻止 HS 算法陷入局部最优。Zou 等人<sup>[11-13]</sup>同时引入粒子群优化和遗传算法, 前者用于位置更新, 后者用于遗传变异。

### 2.2.2 在其他元启发式算法中引入和声搜索算法组件

Li 等人<sup>[28]</sup>在粒子群优化中引入 HS 算法来解决高维优化问题。Liao 等人<sup>[29]</sup>在差分演化算法中引入 HS 算法的组件。Qinghua 等人<sup>[30]</sup>用 HS 算法增强遗传算法的鲁棒性。Nadi 等人<sup>[31]</sup>用 HS 来平衡遗传算法的全局探索和局部开采能力。文献<sup>[32]</sup>在变邻域搜索中引入和声搜索, 在每一个邻域使用 HS 进行搜索。Kaveh 等人<sup>[33]</sup>提出一种将粒子群优化器、蚁群优化和 HS 机制相结合的方法, 利用带被动聚集的粒子群优化算法作为全局搜索, 蚁群算法作为局部搜索, 和声搜索算法处理变量约束。

## 3 和声搜索算法的应用

HS 算法及其改进算法被广泛用于优化、分类和工程应用, HS 算法的应用情况用图 3 表示。

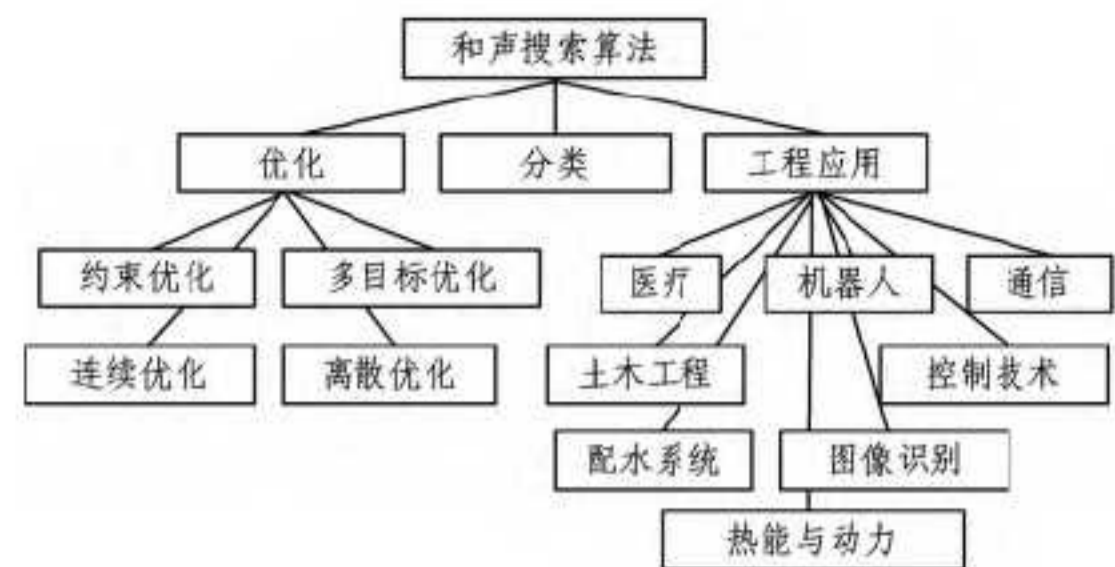


图 3 HS 的应用

## 3.1 优化

### 3.1.1 连续优化

和声搜索算法大多用于经典的 benchmark 连续函数优化问题<sup>[2,6,7,34]</sup>, 以及大量混合连续/离散的结构优化问题<sup>[14,17,33]</sup>, 如焊接梁结构设计、压力容器设计、truss 架结构优化。仿真实验结果表明, 和声搜索算法比其他的元启发式算法更有效, 如粒子群优化算法、差分演化算法、遗传算法和模拟退火。

### 3.1.2 离散优化

通过变换产生新解的第 2 种操作即第一次变异, HS 算法也同样适用于离散优化问题。HS 算法在提出时就在经典的组合优化问题——旅行商问题上检验性能<sup>[1]</sup>, 目前已经大量用于离散优化问题, 如东北大学的邹德旋等人用 HS 算法求解任务分配问题<sup>[12]</sup>和 0-1 背包问题<sup>[13]</sup>, 清华大学的王凌和聊城大学的潘全科等人用 HS 算法求解流水车间调度问题<sup>[35,36]</sup>, 马来西亚理工大学的 Mohammed 等人将 HS 算法应用于护士轮班问题<sup>[37]</sup>和考试时间表问题<sup>[10]</sup>, HS 算法提出者 Geem 等人用 HS 求解车辆调度问题<sup>[38]</sup>和水管网设计问题<sup>[22,39]</sup>。

### 3.1.3 多目标优化

首次将 HS 用于多目标优化问题是 Geem 于 2006 年将 HS 用于卫星热导管的设计<sup>[40]</sup>, 卫星热导管设计问题的目的是将热导管的热导性最大化时其质量最小(太空中的热导管, 其质量等价于重量), HS 找到了 Pareto 最优解。近几年越来越多的研究者将 HS 用于多目标优化问题, 如文献<sup>[41]</sup>中提出一种多目标 HS 算法用于 24 小时医疗急救单位的最优分布, 目标是达到服务质量最优和成本最低, 在现实场景(西班牙瓜达拉哈拉和昆卡两省的医疗中心的地理分布)进行了仿真实验, 提出的算法获得了 Pareto 最优解集, 供急救单位选址选择。文献<sup>[42]</sup>提出一种多目标 HS 算法用于电力系统最优潮流问题, 在标准 IEEE30 节点系统上的实验结果表明该文献提出的算法能获得比经典的基于非支配排序的多目标遗传算法(NSGA-II)分布性更好的 Pareto 最优解。文献<sup>[43]</sup>提出多目标 HS 算法最小化燃料成本和燃料排放这两个互相冲突的目标, 在标准 IEEE30 节点和 118 节点系统的仿真结果表明了提出的多目标 HS 算法的有效性。文献<sup>[44]</sup>提出一种新的两目标 HS 算法用于无线传感器网络节点定位问题, 实验结果表明提出的方法优于 Pareto 存档进化方法(PAES)。

### 3.1.4 约束优化

Geem 提出 HS 算法时, 在一个相对简单的约束函数上进行实验来检验算法的搜索能力, 实验结果表明 HS 能获得比遗传算法和演化规划更好的解<sup>[1]</sup>。邹德旋等人将 HS 用于 3



个带多个约束条件的可靠性优化问题<sup>[11]</sup>。还有很多研究者用 HS 算法求解约束函数,如文献<sup>[2,14,17,29,45]</sup>。实验结果表明 HS 在求解约束优化时的有效性。

### 3.2 分类

HS 被用于机器学习、数据挖掘和神经网络中的分类问题。文献<sup>[46]</sup>提出 HS 分类算法,并用于挖掘数据流,称为基于和声的增量分类器,实验结果显示 HS 算法适用于分类批量数据。Mahdavi 等人运用 3 种混合 HS 算法和 K-means 聚类算法对网络文件聚类<sup>[47]</sup>。文献<sup>[48]</sup>提出了基于和声搜索的特征选择方法。文献<sup>[49]</sup>用 HS 算法训练前向人工神经网络。

### 3.3 工程应用

HS 广泛应用于工程实践中,包括配水系统、热能与动力工程、土木工程、机器人与控制技术、医疗、通信、图像识别等。

配水系统:HS 被提出后大量应用于配水系统的设计上,其中以提出者 Geem 为主,如文献<sup>[3,4,22,39]</sup>。配水系统设计的目的是要通过选择最小的管道直径,来减少设计成本,同时在每一个节点处要满足压力和数量要求。实验结果表明 HS 算法能获得比遗传算法、模拟退火、禁忌搜索、蚁群优化和分散搜索算法更低的设计成本。

热能与动力:如前述 HS 用于解决多目标卫星导热管设计问题<sup>[40]</sup>、电力系统中最优潮流问题<sup>[42]</sup>和动态经济调度问题<sup>[9,43]</sup>。文献<sup>[50]</sup>将 HS 用于输电网络规划设计问题,在 3 个标准测试系统上的实验结果显示 HS 的鲁棒性和有效性比遗传算法、细菌觅食与差分演化的混合算法更好。

土木工程:主要以中国水利水电科学研究院的李亮将 HS 应用于土坡稳定性分析为主,如文献<sup>[51,52]</sup>,利用 HS 算法搜索出土坡最危险的滑动面。

机器人:用启发式算法去解决机器人领域的应用问题是重要的挑战之一,如重建机器人的最优设计、最优路径规划和机器人运动控制。文献<sup>[53,54]</sup>将 HS 算法分别应用于重建移动机器人的最优设计和机器人最优路径规划。Yazdi 等人将神经网络与 HS 算法混合控制机器人在行走时手臂的运动以便机器人走得更快更稳<sup>[55]</sup>。

控制技术:近年来,模糊逻辑控制大量用于处理现代控制系统中的不确定性和非线性问题,但是模糊逻辑控制有大量的参数需要调整,元启发式算法很适合用于解决这类参数优化问题。文献<sup>[56,57]</sup>提出了采用 HS 算法的模糊控制器。

医疗:Panchal 将 HS 算法用于放射治疗优化停留时间,即受影响组织的残留辐射源持续时间<sup>[58]</sup>。Amor 等人用 HS 算法在有 74 个标准特点的声环境中找出最佳子集,应用于助听器<sup>[59]</sup>。Dong 等人将自适应参数的 HS 算法用于数字图像的生物组织异常检测<sup>[60]</sup>。HS 算法还被用于对癫痫脑电进行识别<sup>[61]</sup>和脑磁图像分割<sup>[62]</sup>。

通信:文献<sup>[63]</sup>将 HS 用于 WiFi 网络配置,实验结果表明 HS 比遗传算法花费的时间更少且得到的解更好。文献<sup>[64]</sup>将 HS 用于通信路径选择,实验结果表明 HS 能获得比遗传算法更好的解。文献<sup>[65]</sup>提出了用于无线通信的 HS 辅助多用户检测算法,该算法能获得较优的性能且复杂度低。

图像识别:文献<sup>[66]</sup>的实验结果显示用 HS 跟踪图像的效果优于粒子滤波方法和卡尔曼滤波方法。四川大学的何小海等人<sup>[67]</sup>基于文献<sup>[66]</sup>的工作将更多改进的 HS 用于图像

目标跟踪。

结束语 HS 算法自 2001 年提出以来,很多研究者对其进行了改进并应用于各个领域,其应用领域覆盖了连续优化、离散优化、约束优化、多目标优化、分类以及大量实践中的工程领域。但是也有学者认为 HS 只是  $(\mu+1)$  演化策略 (Evolution Strategies; ES) 的一个特例<sup>[68]</sup>。HS 的如下问题还值得进一步研究:1) HS 算法的性能还有很大的提升空间,因此不管是对 HS 本身的改进还是混合其他算法都将是一个研究方向;2) HS 在动态、不确定性环境下的应用较少,其他领域的应用也可进一步拓展;3) HS 的理论研究很少,目前还只有少量研究了算法收敛性、随机偏导、种群变量分析。

## 参考文献

- [1] Geem Z W, Kim J H, Loganathan G V. A new heuristic optimization algorithm: Harmony search[J]. Simulation, 2001, 76(2): 60-68
- [2] Das S, Mukhopadhyay A, Roy A, et al. Exploratory power of the harmony search algorithm: analysis and improvements for global numerical optimization [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 2011, 41(1): 89-106
- [3] Geem Z W. Improved harmony search from ensemble of music players[C]// Proc of the 10th International Conference Proceedings of KES, the South Coast of the United Kingdom. Berlin: Springer, 2006: 86-93
- [4] Geem Z W. Global Optimization Using Harmony Search: Theoretical foundations and applications[J]. Foundations of Comput. Intel., 2009, 3(203): 57-73
- [5] Omran Mahamed G H, Mahdavi M. Global-best harmony search [J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 198(2): 643-656
- [6] Pan Q K, Suganthan P N, Fatih T M, et al. A self-adaptive global best harmony search algorithm for continuous optimization problems[J]. Applied Mathematics and Computation, 2010, 216(3): 830-848
- [7] Chakraborty P, Roy G G, Das S, et al. An improved harmony search algorithm with differential mutation operator[J]. Fundamenta Informaticae, 2009, 95(4): 401-426
- [8] Li L P, Wang L. Hybrid algorithms based on harmony search and differential evolution for global optimization[C]// Proc of GEC. Shanghai, China: ACM press, 2009: 271-278
- [9] Arul R, Ravi G, Velusami S. Chaotic self-adaptive differential harmony search algorithm based dynamic economic dispatch[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2013, 50: 85-96
- [10] Al-Betar MA, Khader AT, Nadi F. Selection mechanisms in memory consideration for examination timetabling with harmony search[C]// Proc of the 12th annual conference on genetic and evolutionary computation. Portland, Oregon, USA, New York: ACM press, 2010: 1203-1210
- [11] Zou D X, Gao L Q, Wu J H, et al. A novel global harmony search algorithm for reliability problems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(2): 307-316
- [12] Zou D X, Gao L Q, Li S, et al. A novel global harmony search algorithm for task assignment problem[J]. Journal of Systems and Software, 2010, 83(10): 1678-1688
- [13] Zou D X, Gao L Q, Li S, et al. Solving 0-1 knapsack problem by a novel global harmony search algorithm[J]. Applied Soft Com-

- puting, 2011, 11(2): 1556-1564
- [14] Mahdavi M, Fesanghary M, Damangir E, et al. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, 188(2): 1567-1579
- [15] Pan Q K, Suganthan P N, Tasgetiren M F, et al. A harmony search algorithm with ensemble of parameter sets[C]// *Proc of the 2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Trondheim, Norway, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 1815-1820
- [16] 孔芝, 高利群, 王立谦. 自适应和声搜索算法及在粗糙集属性约简中的应用[J]. *控制与决策*, 2009, 24(10): 1580-1584
- [17] Majid J, Esmail K. Two improved harmony search algorithms for solving engineering optimization problems[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(11): 3316-3331
- [18] Majid J, Esmail K. Solving the sum-of-ratios problems by a harmony search algorithm[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2010, 234(3): 733-742
- [19] 赵鹏军, 刘三阳. 一种新的智能优化及其改进研究[J]. *小型微型计算机系统*, 2010, 5(5): 955-958
- [20] Gao X Z, Wang X L, Ovaska S J. Uni-modal and multi-modal optimization using modified harmony search methods[J]. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2009, 10(5A): 2985-2996
- [21] Alia O M, Mandava R. The variants of the harmony search algorithm: an overview[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2011, 36(1): 49-68
- [22] Geem Z W. Particle-swarm harmony search for water network design[J]. *Eng Optim*, 2009, 41(4): 297-311
- [23] Taherinejad N. Highly reliable harmony search algorithm[C]// *Proc of ECCTD 2009 European conference on Circuit theory and design*. Antalya, Turkey, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 818-822
- [24] Liu L, Zhou H. Hybridization of harmony search with variable neighborhood search for restrictive single-machine earliness/tardiness problem[J]. *Information Sciences*, 2013, 226: 68-92
- [25] Wang X L, Gao X Z, OVASKA SEppo J. Fusion of clonal selection algorithm and harmony search method in optimisation of fuzzy classification systems[J]. *International Journal Bioinspired Computation*, 2009, 1(1): 80-88
- [26] 郝冰, 任献花, 高岳林, 等. 和声搜索—分布估计混合算法求解多目标优化问题[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(5): 1659-1661
- [27] Lee Y C, Zomaya A Y. Interweaving heterogeneous metaheuristics using harmony search algorithm[C]// *IEEE international symposium on parallel & distributed processing*. Rome, Italy, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 1-8
- [28] Li H Q, Li L. A novel hybrid particle swarm optimization algorithm combined with harmony search for high dimensional optimization problems[C]// *Proc of the International Conference on Intelligent Pervasive Computing*. Jeju Island, Korea, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 94-97
- [29] Liao T W. Two hybrid differential evolution algorithms for engineering design optimization[J]. *Applied Soft Computing Journal*, 2010, 10(4): 1188-1199
- [30] Li Q H, Yang S D, Ruan Y L. A hybrid algorithm for optimizing multi-modal functions[J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2006, 11(3): 551-554
- [31] Nadi F, Khader A T, Al-Betar M A. Adaptive genetic algorithm using harmony search[C]// *GECCO' 10*. Portland, Oregon, USA, New York: ACM press, 2010: 819-820
- [32] Huang M, Dong H Y, Wang X W, et al. Guided variable neighborhood harmony search for integrated charge planning in primary steelmaking processes[C]// *Proc of GEC*. Shanghai, China: ACM press, 2009: 231-238,
- [33] Kaveh A, Talatahari S. Particle swarm optimizer, ant colony strategy and harmony search scheme hybridized for optimization of truss structures[J]. *Computers and Structures*, 2009, 87: 267-283
- [34] Lee K S, Geem Z W. A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice[J]. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 2005, 194: 3902-3933
- [35] Pan Q K, Wang L, Gao L. A chaotic harmony search algorithm for the flow shop scheduling problem with limited buffers[J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(8): 5270-5280
- [36] Wang L, Pan Q K, Tasgetiren M F. Minimizing the total flow time in a flow shop with blocking by using hybrid harmony search algorithms[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(12): 7929-7936
- [37] Mohammed H, Masri A, Nasser S R, et al. A harmony search algorithm for nurse rostering problems[J]. *Information Sciences*, 2013, 233: 126-140
- [38] Geem Z W, Lee K S, Park Y. Application of harmony search to vehicle routing[J]. *American Journal of Applied Sciences*, 2005, 2(12): 1552-1557
- [39] Geem Z W. Novel derivative of harmony search algorithm for discrete design variables[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2008, 199(1): 223-230
- [40] Geem Z W, Hwangbo H. Application of harmony search to multi-objective optimization for satellite heat pipe design[C]// *Proc of UKC 2006 AST-1. 1 (CD)*. Teaneck, New Jersey, 2006: 1-3
- [41] Landa-Torres I, Manjarres D, Salcedo-Sabz S, et al. A multi-objective grouping harmony search algorithm for the optimal distribution of 24-hour medical emergency units[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(6): 2343-2349
- [42] Sivasubramani S, Swarup K S. Multi-objective harmony search algorithm for optimal power flow problem[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2011, 33(3): 745-752
- [43] Sivasubramani S, Swarup K S. Environmental/economic dispatch using multi-objective harmony search algorithm[J]. *Electric Power Systems Research*, 2011, 81(9): 1778-1785
- [44] Diana M, Javier D S, Sergio G L, et al. On the design of a novel two-objective harmony search approach for distance- and connectivity-based localization in wireless sensor networks[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, 26(2): 669-676
- [45] Gao X Z, Wang X L, Jari O S, et al. A modified harmony search method in constrained optimization[J]. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2010, 6(9): 4235-4247
- [46] Zohre K, Hassan A, Hamid B. A new method of mining data streams using harmony search[J]. *Journal of Intelligent Information Systems*, 2012, 39(2): 491-511

(下转第 75 页)



在实验中同时也发现了一些不知之处,比如第一次预测值的概率计算没有参照物,故实验中采用各分量概率相等,但结果显示这一做法对精度有较大影响,于是第一个时间点数据采用已知数据来代替,从长远的角度来看,这种处理方法是可行的。

### 参考文献

[1] 王晓兰,李辉.基于EMD与LS-SVM的风电场短期风速预测[J].计算机工程与设计,2010,31(10):2303-2307  
 [2] 刘兴杰,米增强,杨奇逊,等.一种基于EMD的短期风速多步预测方法[J].电工技术学报,2010,25(4):165-170  
 [3] 戴浪,黄守道,黄科元,等.风电场风速的神经网络组合预测模型[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(4):27-31  
 [4] 张娅莉,喇果彦.GRNN神经网络在信息分析预测中的应用[J].数据采集与处理,2009,24(S):100-103  
 [5] Huang N E, Shen Z, Long S R. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary

time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society London, 1998, 454 (1): 903-905  
 [6] 储茂得,周松林.基于小波分析与神经网络的风电场短期风速预测[J].安徽科技学院学报,2011,25(1):35-38  
 [7] 闻新,周露,李翔,等. MATLAB神经网络仿真与应用[M].北京:科学出版社,2003  
 [8] 赵新泽,蒋光震,何灿芝,等.概率论与数理统计教程[M].成都:西南交通大学出版社,1991  
 [9] 陈欣,宋丽莉,黄浩辉,等.中国典型地区风能资源特性研究[J].太阳能学报,2011,32(3):331-336  
 [10] 储茂得,周松林.基于小波分析与神经网络的风电场短期风速预测[J].安徽科技学院学报,2011,25(1):35-38  
 [11] 王晓兰,李辉.风电场输出功率年度预测中有效风速预测研究[J].中国电机工程学报,2010,30(8):117-122  
 [12] 杨锡运,孙翰墨.基于时间序列模型的风电场风速预测研究[J].动力工程学报,2011,3(21):203-208  
 [13] 曾杰,张华.基于蚁群优化的最小二乘支持向量机风速预测模型研究[J].太阳能学报,2011,32(3):296-300

(上接第56页)

[47] Mahdavi M, Chehreghani M H, Abolhassani H, et al. Novel meta-heuristic algorithms for clustering web documents [J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 201: 441-451  
 [48] Ren D, Qiang S. Feature selection with harmony search [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2012, 42(6): 1509-1523  
 [49] Ali K, Rosni A, Abdul S R. Harmony search based supervised training of artificial neural networks [C] // Proc of the 1st International Conference on Intelligent Systems, Modeling and Simulation, Liverpool, United Kingdom, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 105-110  
 [50] Verma A, Panigrahi B K, Bijwe P R. Harmony search algorithm for transmission network expansion planning [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(6): 663-673  
 [51] 李亮,王玉杰,王秋生,等.土坡稳定分析中模拟任意滑动面的新策略及其效率分析[J].水利学报,2008,39(5):535-541  
 [52] Cheng Y M, Li L, Lansivaara T, Chi S C, et al. An improved harmony search minimization algorithm using different slip surface generation methods for slope stability analysis [J]. Engineering Optimization, 2008, 40(2): 95-115  
 [53] Xu H, Gao X Z, Wang T, et al. Harmony search optimization algorithm; application to a reconfigurable mobile robot prototype [J]. Stud. Comput. Intell, 2011, 270: 11-22  
 [54] Tangpattanakul P, Meesomboon A, Artrit P. Optimal trajectory of robot manipulator using harmony search algorithms [J]. Stud. Comput. Intell, 2010, 270: 23-36  
 [55] Yazdi E, Azizi V, Haghghat A T. A new biped locomotion involving arms swing based on neural network with harmony search optimizer [C] // Proc of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. Chongqing, China: IEEE Press, 2011: 18-23  
 [56] Coelho L S, Diego L, Bernert A. A harmony search approach using exponential probability distribution applied to fuzzy logic control optimization [J]. Stud. Comput. Intell, 2010, 270: 77-88  
 [57] Das S K, Chatterjee A, Rakshit A. Design of a hybrid stable adaptive fuzzy controller employing lyapunov theory and harmony search algorithm [J]. IEEE Trans. Contr. Syst. Tech, 2010, 18: 1440-1447

[58] Panehal A. Harmony search optimization for HDR prostate brachytherapy [D]. American Association of Physicists in Medicine, 2009: 720-721  
 [59] Amor J, Alexandre E, Gilpita R. Music-inspired harmony-search algorithm applied to feature selection for sound classification in hearings aids [C] // Proc of Audio Engineering Society the 124th Convention, Netherlands, UK, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 17-20  
 [60] Dong H, Bo Y, Gao M. Improved harmony search for detection with Photon density wave [C] // Proceedings of SPIE. Washington: SPIE Press, 2008: 1-9  
 [61] Gandhi T K, Chakraborty P, Roy G G, et al. Discrete harmony search based expert model for epileptic seizure detection in electroencephalography [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(4): 4055-4063  
 [62] Alia O M, Mandava R, Aziz M E. A hybrid harmony search algorithm to mri brain segmentation [C] // Proc of the 9th IEEE international conference on cognitive informatics. Beijing, China: IEEE Press, 2010: 712-719  
 [63] Landa T I, Gil-Lopez S, Del S J, et al. Efficient citywide planning of open WiFi access networks using novel grouping harmony search heuristics [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(3): 1124-1130  
 [64] Forsati R, Haghghat A T, Mahdavi M. Harmony search based algorithms for bandwidth-delay-constrained least-cost multicast routing [J]. Computer Communications, 2008, 31(10): 2505-2519  
 [65] Zhang R, Hanzo L. Iterative multiuser detection and channel decoding for DS-CDMA using harmony search [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(10): 917-920  
 [66] Jaco F, Steven M, Richard G. Harmony filter: A robust visual tracking system using the improved harmony search algorithm [J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(12): 1702-1716  
 [67] Gao M L, He X H, Luo D S, et al. Object tracking based on harmony search comparative study [J]. Journal of Electronic Imaging, 2012, 21(4)  
 [68] Sörensen K. Metaheuristics-the metaphor exposed [J]. International Transactions in Operational Research, 2013: 1-16