

文章编号:1671-6833(2019)05-0001-12

# 启发式多目标优化算法在能源和电力系统中的 典型应用综述

朱晓东<sup>1</sup>, 王 颖<sup>1</sup>, 杨之乐<sup>2</sup>, 郭媛君<sup>2</sup>

(1.郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001;2.中国科学院 深圳先进技术研究院,广东 深圳 518000)

**摘 要:** 能源与电力系统是现代社会人类生存和发展的基础,在发电、热转换等能源传输和转化过程中存在着极大的低效和浪费,造成日益严重的环境污染与资源消耗.针对能源电力系统中的经济性、环保性及社会友好性等多个目标进行全面、综合的优化设计和运行调度,是创造低碳智慧能源的必要途径.基于启发式多目标优化算法具有灵活性高、适用范围广、求解效率高等特点,经过数十年的发展,现已成为工程优化领域的重要求解工具.本文旨在系统地整理启发式多目标优化算法在求解电力和能源系统中典型问题的应用,重点对6个典型问题的求解应用进行探讨、分析,结合现阶段存在的问题,指出该领域未来亟待研究和探索的方向.

**关键词:** 多目标优化;电力系统;能源系统;帕累托最优解;启发式优化算法

**中图分类号:** TU528.1

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2019.05.010

## 0 引言

能源和电力系统作为现代化国家生存发展的支柱和动力,与社会经济高速稳定运行、生态环境可持续发展息息相关.由于电力系统规模大、分布范围广、参与对象多,致使该系统极其复杂,具有高度的非线性和耦合性,系统成本控制和经济性运行优化也变得非常困难<sup>[1]</sup>.另一方面,基于化石能源的火力发电占比很高,其大量能耗所造成的空气污染和碳排放严重威胁着全球气候状态和局部生态环境<sup>[2]</sup>.针对能源和电力系统的设计和运行,提供高效灵活的优化工具,对降低复杂能源系统运营成本、合理优化资源配置、控制环境影响因素等多个方面都具有重要意义.考虑能源电力系统的规模和基数,极小比例的性能优化与提高所创造的价值都是极为显著的.

在复杂庞大的电力能源系统中,诸多典型复杂的多目标优化问题都还未得到有效解决,大规模电力系统调度是其中一类较有代表性的应用问

题.电力系统调度的优化是在若干个现实物理对象的运行约束条件下,实现整个系统所需要的总费用、消耗能源总量及对环境产生的影响等多个目标的最优化.电力系统的优化问题早在20世纪后期就已受到学术界的关注<sup>[3]</sup>.根据优化层次和时间尺度不同,电力系统调度任务包括经济负荷分配(economic load dispatch, ELD)、机组组合(unit commitment, UC)、最优潮流(optimal power flow, OPF)、分布式发电选址与定容(optimal site and sizing of DG)等4个不同时间尺度和运行状态下的优化问题.文献[4-5]针对常见的进化算法在经济负荷与环境问题上的应用做了概述,介绍了启发式算法在经济负荷分配优化中的优势.文献[6-7]以及文献[8-9]分别对经济负荷调度和潮流分析中的优化方法进行了概述,并指出其对于电力系统优化的意义.随着可再生能源等高随机性对象的加入,文献[10-11]对机组组合问题采用随机建模方法,提出了相应的优化工具并进行最优求解.除电力系统调度外,其他能源应用

收稿日期:2018-10-15;修订日期:2018-12-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607177、61876169、61433012、U1435215);国家博士后科学基金面上项目(2018M631005);广东省自然科学基金博士启动项目(2018A030310671)

作者简介:朱晓东(1970—),男,河南郑州人,郑州大学副教授,主要从事智能控制及智能信息处理方面的研究,  
E-mail:zhu\_xd@zzu.edu.cn.

通信作者:杨之乐(1987—),男,河南郑州人,中国科学院深圳先进技术研究院助理研究员,主要从事神经网络、进化计算等人工智能方法在能源及电力系统中的应用,E-mail:zl.yang@siat.ac.cn.

系统也普遍存在一些典型的多目标复杂优化问题,如混合动力汽车(hybrid electric vehicle, HEV)的能源管理同样存在着多种运行目标需要平衡和优化的问题.文献[13-14]概述了 HEV 的整车能量控制问题,针对 HEV 中的能源管理策略优化进行了全面探究.此外,具有混合整数复杂优化特点的换热器设计,也是能源领域典型的多目标优化问题<sup>[15]</sup>,得到了广泛的关注和应用尝试.

在能源和电力系统的多目标优化应用中,传统方法多是将其采用加权或者线性规划等方法转化为单目标优化问题,权重选择较为困难,对于实际工程中存在多个冲突目标的问题无法得到有效解决.随着启发式算法的不断发展以及在多目标优化问题上的成功应用,大量多目标优化算法应用于能源和电力系统中.笔者首先简要介绍了启发式多目标算法;随后,针对 6 个典型能源和电力系统多目标问题的求解应用进行了分析和综述;最后,结合现阶段存在的问题,指出该领域未来亟待研究和探索的方向.

## 1 启发式多目标优化算法概述

启发式算法又称为智能优化算法,在 20 世纪 80 年代末期开始发展,在迭代随机寻优的算法框架结构基础上,根据自然界和生活中常见的现象来构造算法逻辑,求解一个或者多个目标组合的最优值问题.早期出现的启发式算法主要有 1975 年提出的遗传算法(GA)<sup>[16]</sup>、1995 年提出的粒子群优化算法(PSO)<sup>[17]</sup>、差分进化算法(DE)<sup>[18]</sup>以及近期提出的教学优化算法(TLBO)<sup>[19]</sup>等,这些算法多数用来解决单目标问题,能实现优化的目标仅为一个.

多目标优化问题(Multi-objective optimization problems, MOP),构造多于一个且常常相互矛盾的优化目标,如式(1)所示:

$$\begin{aligned} \min y = f(x) &= [f_1(x) \quad f_2(x) \quad \cdots \quad f_n(x)] \\ n &= 1, 2, \cdots, N \\ g_i(x) &\leq 0, i = 1, 2, \cdots, k \\ h_j(x) &= 0, j = 1, 2, \cdots, k \\ x &= [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_d \quad \cdots \quad x_D] \\ x_{d\_min} &\leq x_d \leq x_{d\_max}, d = 1, 2, \cdots, D. \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $N$ 为优化的目标个数; $D$ 为决策变量的维度; $g_i(x)$ 、 $h_j(x)$ 为约束条件.

对于工程中的多目标问题,传统算法并不能有效进行求解,为了解决相互冲突或者相互影响的多目标问题,出现了启发式多目标优化算法.

1985 年提出的矢量评价遗传算法(VEGA)<sup>[20]</sup>,首次采用启发式算法解决含 MOP 的相关问题.随后,出现了一些在遗传算法框架基础上的 MOP 改进算法,如 MOGA<sup>[21]</sup>、NPGA<sup>[22]</sup>等.追溯启发式多目标优化算法的发展历程,可以将其分为两个阶段:第一阶段主要分为不基于 Pareto 优化和基于 Pareto 优化两部分;第二阶段是在第一阶段的基础上提出外部集的概念,对最优解较好的分布性做出改进.笔者对这两个阶段的发展进行简要回顾.

### 1.1 Pareto 相关算法

在基于 Pareto 优化的方法中,工程应用上较为典型的算法为 Deb 等人提出的基于非支配排序的遗传算法系列<sup>[23]</sup>(NSGA).

Deb 等<sup>[24]</sup>在 1994 年根据 Goldberg 的建议,采用非支配排序的方法将种群进行排序,然后与遗传算法相结合,同时采用小生境和形态学方法进行最优个体选择,以此寻找多个 Pareto 最优解.该方法的优势在于最优解分布均匀,但是又存在计算效率较低、复杂度较高并缺少精英机制的缺陷.随后 Deb 等针对 NSGA 算法的这一缺陷对其进行改进,提出 NSGA-II 算法<sup>[25]</sup>,在原算法的基础上提出了拥挤度比较算子,在同一非支配层对个体进行拥挤度比较,选择拥挤度较大的个体,并引进精英策略,扩大采样空间,有效提高了寻找最优解的能力和算法速度,同时保存了种群的多样性,减少算法复杂度.NSGA-II 虽然有了很大的改进,但对于 3 个及 3 个以上目标进行优化时并不完全适用,针对超多目标的情况,他们提出了 NSGA-III 算法<sup>[26-27]</sup>.采用基于参考点的方法,结合 NSGA-II 框架,在选择最优个体时采用关联和小生境技术,能够有效地实现 3~15 个目标优化,并得到较好的 Pareto 解.一些算法在解决实际工程中的多目标优化问题有显著的优势,同时得到了业界的肯定.

另外一类算法是不基于 Pareto 优化的方法,较为典型的是 2007 年由张青富等提出的基于分解的多目标优化方法(MOEA/D)<sup>[28]</sup>.该方法采用标量化的思想,将多目标问题分解为多个标量子问题,并对各个子问题根据其相邻子问题进行同步优化,进而求出最优解.该方法在求解效率和精度上具有优势,已成为最具代表性的启发式多目标算法<sup>[29]</sup>.该算法在低维目标情况下,相比 NSGA-II 算法在时间复杂度、均匀性以及收敛性上优势突出;在某些高维度情况下其均匀性差于

NSGA-II.

## 1.2 基于外部集相关算法

智能优化算法发展的第二个阶段引入了外部集的概念,用来保存当代所有的非支配个体,保证寻找的 Pareto 解分布均匀,保持了种群的多样性.这一阶段提出的算法较多,常见的有文献[30]提出的强度帕累托进化算法(SPEA),在已有优化算法的基础上采用外部集合来存储非支配解,并根据个体的外部非支配点数量来评估适应性,同时结合聚类方法来控制非支配集的大小,因此可以保证选择阶段搜索的效率.随后,该课题组基于一种新的粒度分配策略针对 SPEA 算法存在的适应度分配不精确和多样性差的问题进行改进,结合密度估计方法和增强存档截断方法,提出了 SPEA-II 算法<sup>[31]</sup>,有效地加快了算法的收敛速度,增强了 Pareto 最优解的分布均匀性.此外,文献[32]提出的帕累托存档演化策略(PAES)也是一种采用外部集的方法,该算法被视为由一个 1+1 策略和一个外部存档方案构成,是相对简单的 MOEA 方法,在工程应用中有很好的表现.因其没有进化算法的交叉和选择步骤,同时结合归档法,使得算法在时间复杂度上明显少于其他算法.上述主流多目标优化算法在 Web of Science 数据库中的文献引用量如图 1 所示.

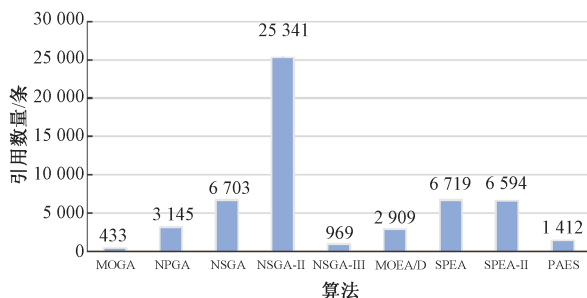


图1 主流多目标优化算法引用量

Fig.1 Citation times of key multi-objective optimization algorithms

## 2 启发式多目标优化算法在能源和电力系统中的典型应用

对于能源与电力系统,在多个时间尺度、规模和运行要求下对应不同的复杂系统多目标优化问题,包括经济负荷分配、机组组合、潮流优化、分布式发电选址与定容以及换热器设计和能源调度等复杂应用.采用启发式多目标优化方法对上述问题进行优化求解,可为大规模能源电力系统提供有效的优化工具,显著提升系统的经济性和环境友好性,因此得到了学术界的广泛关注.近年来,

以上 6 种典型应用多目标优化方法在 Web of Science 数据库的相关文章数量统计如图 2 所示.笔者将对主流优化算法在能源及电力系统中的典型优化问题进行概述和分析.

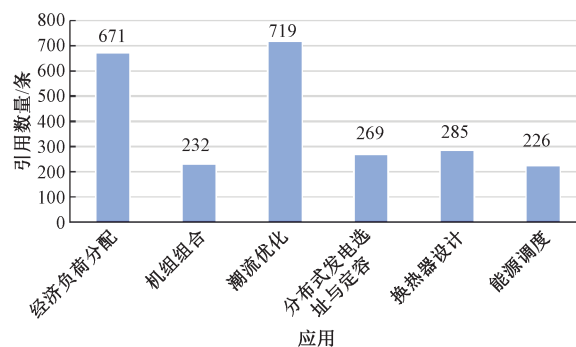


图2 典型能源与电力系统多目标优化应用的文章数据统计

Fig.2 The statistics of article for typical multi-objective applications in power and energy systems

### 2.1 经济负荷分配

在电力系统优化调度中,运行经济性指标是其中首要的考虑因素,而环境因素的重要性也日益突出.因此,多目标经济负荷分配问题是在满足系统负荷和运行约束等条件下,实现总发电成本以及总排放量或者燃料成本最优<sup>[33]</sup>.此类问题含有非线性、非凸和强约束等特点,如同时考虑阀点效应的含有不可导和多峰值等特性,将成为一种典型非线性组合优化问题.针对此类问题,文献[34]提出了多目标的教学优化算法(MOTLBO)与非支配排序法相结合,将燃料成本和排放两个冲突的目标在一定约束条件下优化,有效解决了最优经济调度和最小排放调度问题.此外,针对多目标优化问题,对已有多目标 PSO 算法进行改进也是一种行之有效的方法,文献[35-36]提出了 MOPSO 算法结合模糊自适应技术和自学习策略,文献[37]提出带有目标权重导向的 MOPSO 算法,这些方法均能够在有效的约束条件下找到最优调度解.文献[38]考虑在电力系统中加入风能,并且考虑充放电行为的强约束,将经济与排放作为优化目标,采用 PSO 和 TLBO 相结合的方法实现最优调度.文献[39]对 BBO 算法进行改进,提出了基于对立的 BBO 算法,实现了  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  等排放最小化和经济最优化.文献[40]将经济排放负荷调度问题转为一个约束动态多目标问题,采用非支配排序和记忆选择策略,提出了动态非支配排序的多目标生物地理优化方法

(Dy-NSBBO).另外有学者提出将裸骨教学优化 BBTLBO 算法与 BBO 算法结合<sup>[41]</sup>,将功率分配、燃料成本和排放作为目标进行优化.文献[42]提出小生境遗传禁忌搜索混合算法,应用于多目标负荷分配中.常见的 NSGA-II 算法也被应用到调度优化问题中<sup>[43]</sup>,将经济排放调度问题作为竞争不可补偿的目标进行优化,有效地解决了非线性约束优化问题.

## 2.2 机组组合

随着用电需求的快速增加以及明显存在的峰谷效应,对电力系统机组状态进行及时调整,实现供需平衡和发电资源的合理利用对电力系统的经济性和综合效益极为重要.机组组合优化问题在经济调度的基础上,需要通过机组的启停调度,在系统负荷需求和发电能力需求等约束条件下,实现机组排放量以及发电总费用或者燃料成本等目标达到最优<sup>[44]</sup>.由于二进制开关变量融入了约束条件及目标函数特点,多目标机组组合优化问题又被认为是多约束的非线性混合整数规划问题.为有效求解该类问题,文献[45]将机组的排放和运行费用作为目标,将模因进化算法和 NSGA-II 算法结合,采用局部搜索策略,运用加权和  $\lambda$  迭代法进行优化,从而对机组运行状态进行控制.文献[46]对人工蜂群算法 ABC 进行改进,提出模糊二进制实数编码的人工蜂群算法,将其应用于系统可靠性、燃料成本和排放的优化问题中,在机组组合优化中表现良好.还有学者将 MOEA/D 算法与 DE 算法结合<sup>[47]</sup>提出新的非均匀权向量 (NUWD) 分布策略,三者进行集成,在机组组合优化问题中得到了较好的应用效果.文献[48]将用户能源最小化和系统稳定最大化作为机组组合优化目标,提出了字典排序的多目标优化方法.文献[49-50]对 PSO 进行改进,将所提出的 CPSO 和 MOPSO 算法应用到非线性机组模型中,实现多目标优化.文献[51]提出了多目标量子启发二进制粒子群算法 (QBPSO),将风力的随机性和不可控性因素考虑在内,同时以成本和排放作为目标函数,采用原-对偶内点法来解决机组组合中的调度问题.此外,有学者采用基于最优偏差的萤火虫算法调整模糊度隶属函数,实现燃料成本和系统可靠性的多目标机组组合最优<sup>[52]</sup>.

## 2.3 潮流优化

潮流优化是电力系统短时调度平衡的重要问题,其目标是在满足各种安全性约束的条件下,求解最优的瞬时有功、无功功率,实现网络损耗、燃

料成本、排放最小化等最优要求<sup>[53]</sup>.由于该类优化问题中的有功无功分量常伴有三角函数形式的向量,呈现强非凸非线性的特点,被认为是典型的 NP-hard 问题.文献[54]针对此类问题,对 TLBO 算法进行改进,引入自适应小波变异策略与模糊聚类技术,使系统的总成本和排放量最小.文献[55]对 PSO 算法进行改进,提出了混沌队列方法,并且采用自适应概念调整 PSO 参数中的 IPSO,实现电压稳定与成本、损耗等目标的最优化求解.另外,将多目标 PSO 算法与其他元启发式算法相结合,也是一种有效的求解途径.文献[56]提出一种将 MIPSO 和 TLBO 相结合具有鲁棒性的方法;文献[57]将混合 PSO 算法与人工物理优化 (APO) 算法相结合,提出 HPSO-APO 算法,在实际潮流优化中具有较好的表现.文献[58]提出了拟对立修正的 Jaya 方法 (QOJaya),采用拟对立学习的智能策略,同时引入模糊策略和外部精英库保存方法,实现潮流最优.文献[59]对蛙跳算法进行改进,提出混合蛙跳算法 (MSLFA),并将其应用于潮流优化中,有效避免了陷入局部最优的问题.另有研究将多目标和声搜索算法 (MOHS)<sup>[60]</sup>与快速非支配排序法和拥挤度距离相结合,采用模糊机制能够得到真实且分布均匀的帕累托解集.文献[61]对人工蜂群算法 (ABC) 进行改进,提出了模糊的修正人工蜂群 (MABC),能够在具有离散变量和连续变量的离散潮流中实现总实际功率损耗和电压偏差及损耗等目标的最优.

部分关于经济负荷分配 (ELD)、机组组合 (UC) 和潮流优化 (OPF) 的相关优化算法文献总结如表 1 所示.

## 2.4 分布式发电选址与定容

分布式发电是消纳局部新能源、减小线路损耗、提高电力系统灵活性的有效途径.分布式电源的位置和容量对节点电压、线路潮流和可靠性均会产生影响,科学有效地对其进行优化配置,是保证分布式发电合理性的必要手段.由于分布式电源 (DG) 具有间歇性和随机性的特点,在实现电压偏差、功率及成本优化时,需要考虑的约束条件较多,且多数为强非线性<sup>[62]</sup>,故该优化问题被认为是多约束多目标的非线性非连续规划问题.文献[63]中采用综合多目标优化方法,将 NSGA-II 算法与点估计方法 PEM 结合,以总成本和总网络损耗以及客户的停电成本作为优化目标,达到了预期效果.文献[64]对 NSGA-II 算法进行改进,为了增强全局最



表 1 ELD、UC 及 OPF 相关优化算法  
Tab.1 Optimization algorithm of ELD、UC and OPF

作者、参考文献	时间	优化算法(改进策略)	优化目标	应用
Basu 等 <sup>[43]</sup>	2008	NSGA-II	经济、燃料排放量	ELD
Rout 等 <sup>[34]</sup>	2011	MOTLBO(结合非支配排序算法)	燃料成本、燃料排放量	ELD
Cheng 等 <sup>[38]</sup>	2018	PSO-TLBO	总成本、燃料排放量	ELD
Bahmani 等 <sup>[35]</sup>	2013	MOPSO(结合模糊自适应策略)	总发电成本、燃料排放	ELD
李整等 <sup>[37]</sup>	2015	MOPSO(目标权重导向策略)	动态经济、燃料排放量	ELD
Lokeshgupta 等 <sup>[36]</sup>	2018	MOPSO	节能、减排	ELD
Bhattacharya 等 <sup>[39]</sup>	2011	对立的 BBO 算法(结合对立学习和 BBO 的迁徙学习)	NOX、SOX 的排放量、经济最优	ELD
Ma 等 <sup>[40]</sup>	2017	Dy-NSBBO(动态非支配排序的多目标生物地理优化)	燃料成本、燃料排放量	ELD
Ghoshal 等 <sup>[41]</sup>	2017	BBO-BBOTLBO	总发电成本、燃料排放量	ELD
汪佳等 <sup>[42]</sup>	2013	小生境遗传禁忌搜索混合算法	发电成本、污染排放、负荷调整	ELD
Salani <sup>[48]</sup>	2011	字典多目标优化算法	系统稳定性、用户能源	UC
Li 等 <sup>[45]</sup>	2013	模因进化算法(结合 NSGA-II)	机组污染物排放量、运行费用	UC
Simon 等 <sup>[52]</sup>	2013	基于最优偏差的萤火虫算法(调整模糊度隶属函数)	燃料成本、系统可靠性	UC
Simon 等 <sup>[46]</sup>	2015	模糊二进制实数编码的人工蜂群算法	燃料成本、排放量、系统可靠性	UC
Trivedi 等 <sup>[47]</sup>	2015	MOEA/D-DE(采用非均匀权向量)	最低成本、排放量	UC
Wu 等 <sup>[51]</sup>	2013	QBPSO	成本、排放量	UC
Shukla 等 <sup>[49]</sup>	2016	CPSO(采用带伪码加权改进)	成本最低、排放量	UC
Wang 等 <sup>[50]</sup>	2017	MOPSO	成本、系统可靠性、排放量	UC
Swarupde 等 <sup>[60]</sup>	2011	MOHS(结合非支配排序)	燃料成本、损失、电压稳定性指数	OPF
Niknarm 等 <sup>[59]</sup>	2011	MSLFA	经济成本、排放量	OPF
Khorsandi 等 <sup>[61]</sup>	2013	MABC	实际功率损耗、电压偏差、总排放	OPF
Niknam 等 <sup>[55]</sup>	2012	PSO(采用混沌对列方法)	电压稳定性、成本损耗	OPF
Seifi 等 <sup>[54]</sup>	2014	TLBO(引进自适应小波变异策略)	总成本、排放量	OPF
Sahu 等 <sup>[56]</sup>	2017	MIPSO-TLBO	燃料成本、有源功率损耗、电压偏差	OPF
Teeparthi 等 <sup>[57]</sup>	2017	HPSO-APO	总成本、有功损耗、安全指标	OPF
Warid 等 <sup>[58]</sup>	2018	QOJaya(采用外部精英库保存策略)	燃料成本、实际功率损耗、电压稳定性指数	OPF

优搜索能力,引入了 DE 算法中的变异重组策略,提出 INSGA-II算法,并采用分层聚类方法和改进的排序策略,在给定的目标条件下,该算法能够保持种群的多样性,并且得到了最优帕累托解集. MOEA/D 算法在分布式发电的选址和定容优化上也取得了较好的应用效果<sup>[65]</sup>,实现了分布式发电机(DGS)和并联电容有功和无功损耗的同步优化,达到了最优化选择 DGS 的规模和位置.文献[66]对蛙跳算法进行改进,提出洗牌蛙跳优化方法,并应用于 DGS 的选址和定容,以实际功率损耗和成本为优化目标,达到了理想的效果.文献[67]提出了 Pareto-front 非支配排序多目标粒子群优化算法(PFNDMOPSO),该方法在帕累托最优集中得到目标函数的数值输出结果,然后采用模糊决策模型选择出最终的解决方案,已在径向电网 DG 中得到应用.其他一些改进的启发式算法在 DG 选址和定容优化上也有应用,如帕累托前沿差分进化算法(PFDE)<sup>[68]</sup>.改进的协调搜索算法(IMOHS)<sup>[69]</sup>以及改进的 PSO 算法<sup>[70]</sup>.另外一些组合类的优化方

法,如文献[71]提出的 GA 和 PSO 组合的方法、文献[72]提出的 GA 和帝国主义竞争算法(ICA)组合方法等都可实现 DG 选址和定容中的优化目标要求.该应用的相关算法及优化目标如表 2 所示.

2.5 换热器设计

换热器是一种对流传热及热传导的工业装置,是能源应用系统的典型组成部件.它能够使热量从热流体传递到冷流体,常用的换热器有管翅式和板翅式两种.管翅式换热器芯体为椭圆铝管和曲形铝带的间隔分布,流体通过椭圆铝管时散热,散热效率较高,体积较小;板翅式芯体为铝板通道和直角形波浪铝带的间隔分布,结构强度较高.对换热器进行设计优化,可有效提高换热效率及产品效能,同时节省成本、提高使用寿命<sup>[73]</sup>.已有相当数量的启发式多目标优化工具被用于求解换热器相关约束非线性规划问题.

文献[74-75]采用多目标 TLBO 算法将材料成本、效率、总压降等作为目标,对板翅式散热器进行优化设计,提高性能.文献[76]基于杜鹃的繁

表 2 DG 选址与定容相关优化算法

Tab.2 Optimization algorithms of optimal site and sizing for DG

作者、参考文献	时间	优化算法 (改进策略)	优化目标	应用
Moradi 等 <sup>[71]</sup>	2010	GA-PSO	网络损耗、电压稳定性	DG 选址与定容
Yammani 等 <sup>[66]</sup>	2012	洗牌蛙跳算法	实际功率损耗、总成本	DG 选址与定容
Nekoei 等 <sup>[69]</sup>	2013	IMOHS	功率损耗、电压平衡	DG 选址与定容
Moradi 等 <sup>[72]</sup>	2014	GA-ICA	电压损耗、电压稳定性指数、平衡负荷	DG 选址与定容
Moradi 等 <sup>[68]</sup>	2014	PFDE	电压稳定性、功率损耗、网络电压变化	DG 选址与定容
Hosseini 等 <sup>[63]</sup>	2013	NSGA-II(结合 PEM)	总成本、总网络损耗、客户停电成本	DG 选址与定容
Sheng 等 <sup>[64]</sup>	2015	NSGA-II(引入 DE 中变异重组策略)	最小线损、最小电压成本、最大电压稳定裕度	DG 选址与定容
Mahesh 等 <sup>[67]</sup>	2016	PFNDMOPSO	功率损耗、电压稳定性	DG 选址与定容
Kaur 等 <sup>[70]</sup>	2017	PSO(采用模糊决策方法)	有功损耗、无功损耗、电压偏差	DG 选址与定容
Biswas 等 <sup>[65]</sup>	2017	MOEA/D	有功损耗、无功损耗	DG 选址与定容

殖行为提出多目标杜鹃搜索算法 (IMOC) 解决换热器中的优化问题,该算法能够以较高的精度、较低的不可逆性和较少的迭代次数获得优化目标的最优解.文献[77]采用 NSGA-II 算法和  $\varepsilon$ -NTU 方法进行热力学建模,对含有连续变量和离散变量的目标进行优化,得到理想的帕累托最优解.文献[78]采用多目标遗传算法与 Kriging 响应面相结合,首先优化翅片高度、间距等参数,其次对总热流量和年度费用进行优化,取得了较好的结果.改进的 TLBO 算法在换热器优化设计中也取得了很好的应用,文献[79]采用改进的 TLBO 算法对换热器的效率和总成本进行优化;文献[80]提出的 MO-ITLBO 方法提高了原有的搜索和开发能力,采用基于网格方法自适应评估外部归档中的非支配解决方案,进而实现设计中的多目标优化.文献[81]提出一种新的混合优化方法,将 PSO 和蜂群算法 BA 混合提出 BAHPSO 算法,在板翅式换热器设计中进行验证,证明了其准确性和有效性.

2.6 混合动力汽车能源管理策略

在政策刺激和科技快速进步的推动下,混合动力汽车 (HEV) 得到迅猛发展.因其多种能源供给所带来的经济性、舒适性和环境影响度的平衡策略选择问题,以及 HEV 中替代能源与内燃机 (ICE) 之间的功率分配问题,燃油量与排放量最小问题<sup>[82]</sup>始终是困扰 HEV 厂商的主要难题.对 HEV 实施能源管理策略的多目标优化,可以显著提高混合动力汽车的性能,改善驾驶舒适感,提高燃油经济性并降低对环境的影响程度.

为了解决这类多目标约束非线性问题,在 2011 年,有学者提出了多目标自适应差分进化算法 (MOSADE)<sup>[83]</sup>,采用外部精英归档方法保留非支配解,结合归一化最近邻距离的比较截断算子,有效解决了 HEV 燃料消耗和排放优化问题.文献

[84]采用 NSGA-II 算法对 HC、CO、NO<sub>x</sub> 的排放与经济性 4 个目标同时进行优化,将 3 个部件的尺寸作为参数一起处理,实验表明该方法得到的帕累托最优解较为理想.另外,文献[85-86]采用 NSGA-II 算法对混合储能系统中的总成本、电池容量损失和部件尺寸等冲突性目标进行优化,得出的实验结果表明,该方法对于提高 HEV 的性能和降低成本有明显的帮助.PSO 算法的变体也在 HEV 能源管理策略方面取得了较好的应用,文献[87]提出了基于帕累托的多目标粒子群算法 (PMOPSO),利用拥挤度距离概念来确定粒子的全局最优,有效解决了车辆成本和燃料消耗的优化问题.文献[88]提出基于 PSO 的综合性方法,将尾气排放、成本、燃油消耗多目标问题进行转化,采用 PSO 算法进行优化,通过实验证明了算法的有效性.对于 GA 进行改进,如基于多目标的遗传算法<sup>[89]</sup>和自适应的遗传算法<sup>[90]</sup>以及早期出现的 MOGA 算法<sup>[91]</sup>均能够应用到能源管理策略中,实现控制参数、成本、燃油以及排放等问题的优化,有效提高混合动力汽车的性能.应用于换热器设计以及 HEV 能量管理策略中的相关算法及优化目标总结如表 3 所示.

3 结论及展望

能源和电力系统在国民经济中占据着重要地位,其日益突出的高耗能、高排放等问题期待更灵活有效的解决方法.智能启发式多目标优化方法已在能源与电力系统的系统和局部优化问题中得到了大量成功的应用,对系统的整体经济性能、环境友好性等方面都产生了积极影响.笔者首先对主流多目标优化算法进行了简要回顾,接着概括了能源和电力系统中不同层级的 6 个典型问题,包括经济负荷分配、机组组合、潮流优化、分布

表 3 换热器设计与能源管理相关优化算法

Tab.3 Optimization algorithms for heat exchanger design and HEV powertrain management

作者/参考文献	时间	优化算法(改进策略)	优化目标	应用
Sanaye 等 <sup>[78]</sup>	2010	NSGA- II	效率、总成本	换热器设计
Rao 等 <sup>[76]</sup>	2013	TLBO(采用自适应教学因素)	效率、总成本	换热器设计
Rao 等 <sup>[74]</sup>	2015	MOTLBO	熵产生率、材料成本	换热器设计
Hajabollahi 等 <sup>[75]</sup>	2017	MOTLBO	效率、容积、总压降	换热器设计
Patel 等 <sup>[80]</sup>	2014	MO-ITLBO	总成本、总重量	换热器设计
Wang 等 <sup>[77]</sup>	2015	IMOC	效率、年度成本、泵浦功率	换热器设计
Wen 等 <sup>[79]</sup>	2016	MOGA(结合 Kriging 响应面)	总热流量、年度费用	换热器设计
Zarea 等 <sup>[81]</sup>	2018	BAHPSO	有效性、总年度成本	换热器设计
Poursamad 等 <sup>[90]</sup>	2006	GA(添加惩罚策略)	燃料消耗、排放量	HEV 能源管理策略
Fang 等 <sup>[89]</sup>	2006	MOGA	排放量、动力传动系数	HEV 能源管理策略
Huang 等 <sup>[91]</sup>	2007	MOGA	燃油消耗、排放量	HEV 能源管理策略
Wu 等 <sup>[88]</sup>	2008	综合 PSO	尾气排放、成本、燃油消耗	HEV 能源管理策略
Geng 等 <sup>[87]</sup>	2014	PMOPSO	车辆成本、燃油消耗	HEV 能源管理策略
Hu 等 <sup>[84]</sup>	2004	NSGA- II	HC、NO <sub>x</sub> 、CO 排放量、总成本	HEV 能源管理策略
Buerger 等 <sup>[86]</sup>	2011	NSGA- II	燃料消耗、部件尺寸	HEV 能源管理策略
Song 等 <sup>[85]</sup>	2014	NSGA- II	总成本、容量损失	HEV 能源管理策略
Wu 等 <sup>[83]</sup>	2011	MOSADE(引进外部精英归档方法)	燃料消耗、排放量	HEV 能源管理策略

式发电选址与定容、换热器设计以及混合动力汽车能源管理策略,最后文章对各种多目标优化算法在相关典型问题上的应用做了综述回顾。

尽管已有大量的成功应用,启发式多目标算法在能源和电力领域的应用仍刚刚起步.在能源互联网和综合能源系统大发展的背景下,大量间歇性可再生能源以及多种能源形式的互联对传统的能源电力系统都提出了全新的挑战.启发式多目标优化算法也在不断发展,面向高维多目标、组合优化多目标等复杂问题的启发式新算法和新思路正不断涌现,这些新算法有望为能源和电力系统的优化应用问题提供更有力的求解工具并在更复杂、更贴近实际的多目标优化问题中取得更显著的应用效果。

参考文献:

[1] KOTHARI D P. Power system optimization[C]//Computational Intelligence and Signal Processing (CISP), 2012 2nd National Conference on. IEEE, 2012: 18-21.

[2] LIU Y, LI R, SONG X. Analysis of coupling degrees of urbanization and ecological environment in China[J]. Journal of natural resources, 2005, 20(1): 105-112.

[3] 章美丹. 电力系统优化运行的相关问题研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.

[4] 康重庆,夏清,张伯明. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17):1-11.

[5] PANIGRAHI T K, SAHOO A K, BEHERA A. A review

on application of various heuristic techniques to combined economic and emission dispatch in a modern power system scenario[J]. Energy Procedia, 2017, 138: 458-463.

[6] 李彩华,郭志忠,樊爱军. 电力系统优化调度概述(I):经济调度与最优潮流[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(2):60-63.

[7] HUNECAULT M, GALIANA F D. A survey of the optimal power flow literature[J]. IEEE transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 762-770.

[8] 肖俊明,周谦,瞿博阳,等. 多目标进化算法及其在电力环境经济调度中的应用综述[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2):1-9.

[9] 叶承晋,黄民翔. 考虑暂态稳定性的多目标最优潮流[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10):137-144.

[10] ZHENG Q P, WANG J, LIU A L. Stochastic optimization for unit commitment—a review[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4):1913-1924.

[11] 张晓花,赵晋泉,陈星莺. 节能减排多目标机组组合问题的模糊建模及优化[J]. 中国电机工程学报, 2010(22): 71-76.

[12] 罗禹贡,陈涛,李克强. 智能混合动力电动轿车整车控制系统[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010(8):1271-1276.

[13] 吴剑. 并联式混合动力汽车能量管理策略优化研究[D]. 济南:山东大学, 2008.

[14] YANG Z, LI K, FOLEY A. Computational scheduling methods for integrating plug-in electric vehicles with power systems: A review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 51:396-416.

- [15] WANG Z, LI Y. Layer pattern thermal design and optimization for multistream plate-fin heat exchangers—A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 500–514.
- [16] HOLLAND J H. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence* [M]. MIT press, 1992.
- [17] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory [C]//*Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*. IEEE, 2002:39–43.
- [18] DAS S, SUGANTHAN P N. Differential evolution: a survey of the state-of-the-art[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2011, 15(1): 4–31.
- [19] RAO R. Review of applications of TLBO algorithm and a tutorial for beginners to solve the unconstrained and constrained optimization problems [J]. *Decision Science Letters*, 2016, 5(1): 1–30.
- [20] SCHAFFER J D. *Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms* [C]//*Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*, Lawrence Erlbaum Associates. Inc., Publishers, 1985.
- [21] MURATA T, ISHIBUCHI H. MOGA: multi-objective genetic algorithms [C]//*Evolutionary Computation*, 1995., *IEEE International Conference on*. IEEE, 1995: 289.
- [22] HORN J, NAFPLIOTIS N, GOLDBERG D E. A Niched Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization[M]//*A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization*. 1994.
- [23] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [C]//*International Conference on Parallel Problem Solving From Nature*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2000: 849–858.
- [24] SRINIVAS N, DEB K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. *Evolutionary Computation*, 1994, 2(3): 221–248.
- [25] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182–197.
- [26] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based non-dominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18(4): 577–601.
- [27] JAIN H, DEB K. An Evolutionary Many-objective optimization algorithm using reference-point based non-dominated sorting approach, part II: handling constraints and extending to an adaptive approach [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18(4): 602–622.
- [28] ZHANG Q F, LI H. MOEA/D: A multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 2007, 11(6): 712–731.
- [29] TRIVEDI A, SRINIVASAN D, SANYAL K, et al. A survey of multiobjective evolutionary algorithms based on decomposition[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2017, 21(3): 440–462.
- [30] ZITZLER E, THIELE L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1999, 3(4): 257–271.
- [31] ZITZLER E, LAUMANN S M, THIELE L. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm [J]. *TIK-report*, 2001, 103.
- [32] KNOWLES J, CORNE D. The Pareto Archived Evolution Strategy: A New Baseline Algorithm for Pareto Multiobjective Optimisation[C]. *Proc. 1999 Congress on Evolutionary Computation*. 1999.
- [33] MAHOR A, PRASAD V, RANGNEKAR S. Economic dispatch using particle swarm optimization: A review [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2009, 13(8): 2134–2141.
- [34] KRISHNANAND K R, PANIGRAHI B K, ROUT P K, et al. Application of multi-objective teaching-learning-based algorithm to an economic load dispatch problem with incommensurable objectives [C]//*International Conference on Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011: 697–705.
- [35] BAHMANI-FIROUZI B, FARJAH E, AZIZIPANAH-ABARGHOEE R. An efficient scenario-based and fuzzy self-adaptive learning particle swarm optimization approach for dynamic economic emission dispatch considering load and wind power uncertainties [J]. *Energy*, 2013(50): 232–244.
- [36] LOKESHGUPTA B, SIVASUBRAMANI S. Multi-objective dynamic economic and emission dispatch with demand side management[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018 (97): 334–343.
- [37] 李整, 秦金磊, 谭文, 等. 基于目标权重导向多目标粒子群的节能减排电力系统优化调度 [J]. *中国*

- 电机工程学报, 2015 (S1): 67-74.
- [38] CHENG T, CHEN M, WANG Y, et al. Adaptive robust method for dynamic economic emission dispatch incorporating renewable energy and energy storage[J]. Complexity, 2018, 47(2):1145-1151.
- [39] BHATTACHARYA A, CHATTOPADHYAY P K. Oppositional Biogeography-Based Optimization for multi-objective Economic Emission Load Dispatch [C]//India Conference. IEEE, 2011:1-6.
- [40] MA H, YANG Z, YOU P, et al. Multi-objective biogeography-based optimization for dynamic economic emission load dispatch considering plug-in electric vehicles charging[J]. Energy, 2017, 135: 101-111.
- [41] GHOSHAL S, MAITY D, BANERJEE S, et al. Solution of multi-objective emission & economic dispatch using bare bones TLBO algorithm & biogeography based optimization algorithm [C]//Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2017 Second International Conference on. IEEE, 2017: 1-6.
- [42] 汪佳, 姚建刚, 孙谦, 等. 改进算法在电力系统多目标负荷分配中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1):107-111.
- [43] BASU M. Dynamic economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 30(2):140-149.
- [44] PADHY N P. Unit commitment-a bibliographical survey [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 1196-1205.
- [45] LI Y F, PEDRONI N, ZIO E. A Memetic Evolutionary Multi-Objective Optimization Method for Environmental Power Unit Commitment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):2660-2669.
- [46] CHANDRASEKARAN K, SIMON S P. Multi-objective unit commitment problem with reliability function using fuzzified binary real coded artificial bee colony algorithm[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2012, 6(10):1060-1073.
- [47] TRIVEDI A, SRINIVASAN D, PAL K, et al. Enhanced Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition for Solving the Unit Commitment Problem[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 11(6):1346-1357.
- [48] SALANI M, GIUSTI A, CARO G D, et al. Lexicographic multi-objective optimization for the unit commitment problem and economic dispatch in a microgrid [C]//IEEE Pes International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. IEEE, 2011:1-8.
- [49] SHUKLA A, SINGH S N. Multi-objective unit commitment with renewable energy using hybrid approach[J]. Iet Renewable Power Generation, 2016, 10(3):327-338.
- [50] WANG B, ZHOU M, WATADA J. Unit commitment optimization with pricing support for ultra-low emissions: A multi-objective approach[C]// IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering. IEEE, 2017:692-697.
- [51] WU X, ZHANG B, LI J, et al. Solving power system unit commitment with wind farms using multi-objective quantum-inspired binary particle swarm optimization [J]. Journal of Renewable & Sustainable Energy, 2013, 5(2):341-347.
- [52] CHANDRASEKARAN K, SIMON S P. Optimal Deviation Based Firefly Algorithm Tuned Fuzzy Design for Multi-Objective UCP[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1):460-471.
- [53] HUNECAULT M, GALIANA F D. A survey of the optimal power flow literature [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 762-770.
- [54] SHABANPOUR-HAGHIGHI A, SEIFI A R, NIKNAM T. A modified teaching-learning based optimization for multi-objective optimal power flow problem[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 77: 597-607.
- [55] NIKNAM T, NARIMANI M R, AGHAEI J, et al. Improved particle swarm optimisation for multi-objective optimal power flow considering the cost, loss, emission and voltage stability index[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(6): 515-527.
- [56] SAHU S, BARISAL A K, KAUDI A. Multi-objective optimal power flow with DG placement using TLBO and MIPSO: A comparative study [J]. Energy Procedia, 2017(117): 236-243.
- [57] TEEPARTHI K, KUMAR D M V. Multi-objective hybrid PSO-APO algorithm based security constrained optimal power flow with wind and thermal generators [J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2017, 20(2): 411-426.
- [58] WARID W, HIZAM H, MARIUN N, et al. A novel quasi-oppositional modified Jaya algorithm for multi-objective optimal power flow solution[J]. Applied Soft Computing, 2018, 65: 360-373.
- [59] NIKNAM T, NARIMANI M R, JABBARI M, et al. A modified shuffle frog leaping algorithm for multi-objective optimal power flow [J]. Energy, 2011, 36(11):6420-6432.
- [60] 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.
- [61] KHORSANDI A, HOSSEINIAN S H, GHAZANFARI A. Modified artificial bee colony algorithm based on fuzzy multi-objective technique for optimal power flow problem[J]. *Electric Power Systems Research*, 2013, 95(95):206-213.
- [62] SABOORI H, HEMMATI R, GHIASI S M S, et al. Energy storage planning in electric power distribution networks-A state-of-the-art review[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017, 79: 1108-1121.
- [63] DEHGHANIAN P, HOSSEINI S H, MOEINI-AGHTAIE M, et al. Optimal siting of DG units in power systems from a probabilistic multi-objective optimization perspective[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, 51: 14-26.
- [64] SHENG W, LIU K Y, LIU Y, et al. Optimal placement and sizing of distributed generation via an improved nondominated sorting genetic algorithm II [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(2): 569-578.
- [65] BISWAS P P, MALLIPEDDI R, SUGANTHAN P N, et al. A multiobjective approach for optimal placement and sizing of distributed generators and capacitors in distribution network [J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 60: 268-280.
- [66] YAMMANI C, MAHESWARAPU S, MATAM S. Multi-objective optimization for optimal placement and size of dg using shuffled frog leaping algorithm[J]. *Energy Procedia*, 2012, 14: 990-995.
- [67] MAHESH K, NALLAGOWNDEN P, ELAMVAZUTHI I. Advanced Pareto front non-dominated sorting multi-objective particle swarm optimization for optimal placement and sizing of distributed generation [J]. *Energies*, 2016, 9(12): 982.
- [68] MORADI M H, TOUSI S M R, ABEDINI M. Multi-objective PFDE algorithm for solving the optimal siting and sizing problem of multiple DG sources[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 56: 117-126.
- [69] NEKOOEI K, FARSANGI M M, NEZAMABADIPOUR H, et al. An improved multi-objective harmony search for optimal placement of DGs in distribution systems[J]. *IEEE Transactions on smart grid*, 2013, 4(1): 557-567.
- [70] KAUR N, JAIN S K. Multi-Objective Optimization Approach for Placement of Multiple DGs for Voltage Sensitive Loads[J]. *Energies*, 2017,(10):711-717.
- [71] MORADI M H, ABEDINI M. A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2010, 34(1):66-74.
- [72] MORADI M H, ZEINALZADEH A, MOHAMMADI Y, et al. An efficient hybrid method for solving the optimal siting and sizing problem of DG and shunt capacitor banks simultaneously based on imperialist competitive algorithm and genetic algorithm [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 54: 101-111.
- [73] QUOILIN S, VAN DEN BROEK M, DECLAYE S, et al. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 22: 168-186.
- [74] RAO R V, WAGHMARE G G. Multi-objective design optimization of a plate-fin heat sink using a teaching-learning-based optimization algorithm [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 76: 521-529.
- [75] HAJABDOLLAHI H. Comparison of stationary and rotary matrix heat exchangers using teaching-learning-based optimization algorithm [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2018, 232(4): 493-502.
- [76] WANG Z, LI Y. Irreversibility analysis for optimization design of plate fin heat exchangers using a multi-objective cuckoo search algorithm [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 101: 126-135.
- [77] SANAYE S, HAJABDOLLAHI H. Multi-objective optimization of shell and tube heat exchangers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(14-15): 1937-1945.
- [78] WEN J, YANG H, TONG X, et al. Configuration parameters design and optimization for plate-fin heat exchangers with serrated fin by multi-objective genetic algorithm [J]. *Energy conversion and management*, 2016, 117: 482-489.
- [79] RAO R V, PATEL V. Multi-objective optimization of heat exchangers using a modified teaching-learning-based optimization algorithm [J]. *Applied Mathematical*, 2013, 37(3): 1147-1162.
- [80] PATEL V, SAVSANI V. Optimization of a plate-fin heat exchanger design through an improved multi-objective teaching-learning based optimization (MO-ITLBO) algorithm[J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2014, 92(11):2371-2382.
- [81] ZAREA H, KASHKOOLIF M, SOLTANI M, et al. A



- novel single and multi-objective optimization approach based on Bees Algorithm Hybrid with Particle Swarm Optimization (BAHPSO): application to thermal-economic design of plate fin heat exchangers[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 129: 552–564.
- [82] PANDAY A, BANSAL H O. A review of optimal energy management strategies for hybrid electric vehicle[J]. International Journal of Vehicular Technology, 2014, 2014.
- [83] WU L, WANG Y, YUAN X, et al. Multiobjective optimization of HEV fuel economy and emissions using the self-adaptive differential evolution algorithm [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(6): 2458–2470.
- [84] HU X, WANG Z, LIAO L. Multi-objective optimization of HEV fuel economy and emissions using evolutionary computation [R]. SAE Technical Paper, 2004.
- [85] SONG Z, LI J, HAN X, et al. Multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles [J]. Applied Energy, 2014, 135: 212–224.
- [86] BUERGER S, LOHMANN B, MERZ M, et al. Multi-objective optimization of hybrid electric vehicles considering fuel consumption and dynamic performance [C]//Vehicle Power and Propulsion Conference. IEEE, 2011: 1–6.
- [87] GENG B, MILLS J K, SUN D. Combined power management/design optimization for a fuel cell/battery plug-in hybrid electric vehicle using multi-objective particle swarm optimization [J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(4): 645–654.
- [88] WU J, ZHANG C H, CUI N X. PSO algorithm-based parameter optimization for HEV powertrain and its control strategy [J]. International Journal of Automotive Technology, 2008, 9(1): 53–59.
- [89] FANG L C, QIN S Y. Concurrent Optimization for Parameters of Powertrain and Control System of Hybrid Electric Vehicle Based on Multi-Objective Genetic Algorithms [C]//SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference. IEEE, 2006: 2424–2429.
- [90] MONTAZERI-GH M, POURSAMAD A, GHALICHI B. Application of genetic algorithm for optimization of control strategy in parallel hybrid electric vehicles [J]. Journal of the Franklin Institute, 2006, 343(4): 420–435.
- [91] HUANG B, WANG Z, XU Y. Multi-objective genetic algorithm for hybrid electric vehicle parameter optimization [C]//Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2006: 5177–5182.

## A Survey of Featured Applications of Heuristic Multi-objective Optimization Algorithms in Power and Energy Systems

ZHU Xiaodong<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>1</sup>, YANG Zhile<sup>2</sup>, GUO Yuanjun<sup>2</sup>

(1.School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2.Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** Power and energy systems are the foundation of human survival and development in modern society. They played an indispensable role in daily production and life. However, significant inefficiencies and wastes found in the process of energy transmission and transformation, such as power generation and energy conversion, could result in increasingly environmental pollution and resource consumption. In order to create a low-carbon energy future, it was a necessary way to optimize the design and operation of energy and power systems aiming at maximization to the economic, environmental and social friendly benefit. After decades of development, Multi-objective heuristics optimization algorithms with characteristics of high flexibility, wide application range and high efficiency, have become crucial tools in the solving various engineering optimization. This paper aimed to systematically reviewing state-of-the-art heuristic based multi-objective optimization algorithms for solving six typical problems in power and energy systems. Comprehensive discussions on the methodologies and a brief insight on future research direction have also been proposed.

**Key words:** Multi objective optimization; power system; energy system; Pareto optimal solution; heuristic optimization algorithm