智能电网优化算法：系统性文献综述

Sidra Aslam、Ala Altaweel、Ali Bou Nassif沙迦大学计算与信息学院，沙迦，阿联酋[202844, aaltaweel,anassif]@sharjah.ac.ae

arXiv:2301.07512v1 [cs.NE] 16 Jan 2023

摘要——**电力智能电网是将电力从发电厂输送给用户的系统，旨在降低成本、减少电力故障和损耗，并最大限度地提升能源管理水平。智能电网（SG）因其诸多卓越优势而广为人知，例如双向通信、稳定性、电力故障检测，以及与电器互联以实现监测。智能电网是多种现代应用的成果，这些应用用于数据管理和安全保障，包括建模、监测、优化和／或人工智能。因此，智能电网作为研究领域的重要性逐年上升。本文聚焦于智能电网在家庭和工业领域的新特性与应用。具体而言，我们重点研究遗传算法、粒子群优化和灰狼优化，考察截至目前为实现智能电网能源管理最大化和成本最小化所做的努力。因此，我们在这篇系统性文献综述中收集了145篇研究成果，涵盖2011年至2022年。本研究旨在梳理过去十年提出的智能电网各类特性与应用，并探讨智能电网在世界不同地区的流行趋势。研究发现，研究人员为智能电网能源管理与成本效益提出新解决方案时，最常用的优化算法是粒子群优化。我们还简要概述了用于实现能源与成本效益的解决方案所采用的目标函数和参数，并讨论了未来研究中面临的各类开放研究挑战。**

索引词—**智能电网、元启发式算法、成本效益、能源管理**

I. 引言

智能电网是指将电力从公用事业（发电源/公司）输送给用户（住宅/工业用户）的电网。图1展示了一个简单的智能电网连接，其中公用事业（发电单元）与用户（房屋/电动汽车）之间进行双向通信和功率流。电力输送过程能够实现监测、建模、控制、数据

借助人工智能（AI）或计算智能（CI）等多种智能特征进行筛选和数据处理，如图 2 所示。智能电网支持用户根据定价时段和需求安排电器，从而节约能源、提高可靠性并降低成本 [1]，[2]。此外，智能电网支持家庭区域网络（HAN）或广域网（WAN）等双向电力线通信，以及 ZigBee、6LowPAN、Z-Wave、物联网网络等无线通信 [3]–[6]。

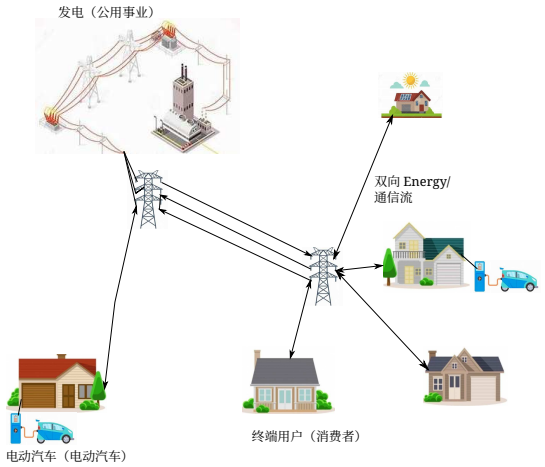

图 1. 简易智能电网

一方面，智能电网中的通信具有诸多优势，例如监测负荷需求、进行需求响应管理；另一方面，它也为威胁打开了大门，可能危及公用事业与用户之间安全且有利可图的电力和信息交换。与安全（可用性、完整性或机密性）相关的威胁称为网络攻击，可能导致用户侧信息遭到未授权披露或监测（例如，安排电器所需的数据） [7], [8]。人们已研究了许多反击方案，例如安全数据收集器、广播认证和安全的抗拒绝服务广播认证协议，以保障数据收集，并高效满足用户需求 [9], [10]。此外，除了保护智能电网免受某些安全攻击外，公用事业和用户还面临其他挑战（能源供应和能源需求），例如能源管理、成本效益、降低功率损耗和减少污染物排放 [11], [12]。通过在智能电网中采用优化技术，可以应对上述挑战；优化技术通过管理电力配送和减少排放，最大限度地提高利润（对用户和公用事业而言）。

智能电网中的优化旨在寻找效益最大化的条件，同时尽可能减少电力浪费和成本 [13]。因此，智能电网中的优化问题被定义为一个需要最小化或最大化的情境（即目标函数），同时（在大多数情况下）受

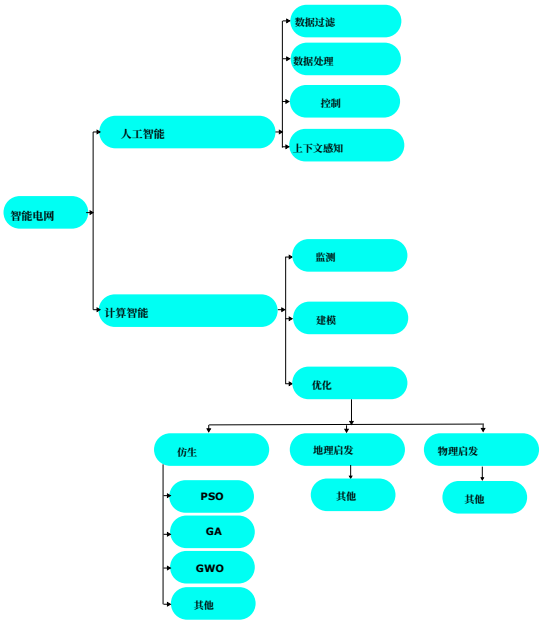

图 2. 智能 电网

一组变量和/或约束条件的影响。根据目标函数和给定的约束条件，优化问题可分为整数规划、混合整数非线性规划、线性规划和非线性规划问题 [14],[15]。为求得目标函数的最优解，人们提出了多种技术。其中一类主要技术是“元启发式优化技术”，被视为解决许多优化问题的重要求解器。元启发式优化技术的一些变体受生物、地理或物理领域启发，并进一步划分为不同的搜索算法，以获得最优解。如图 2 所示，智能电网中优化技术的分类归于计算智能范畴。上述算法的例子包括粒子群优化（PSO）、灰狼优化（GWO）、差分进化（DE）、遗传算法（GA）、人工蜂群算法（ABC）、蚁群优化算法（ACO）等 [15], [16]。鉴于智能电网优化是一个重要的研究主题，能够通过提供有前景的解决方案来帮助减少能源领域的主要问题 [17]–[20], ，本文开展了一项系统综述，重点关注 PSO、GA 和 GWO。在表 I 中，我们列出了本文所用术语的缩略语和关键词。

本系统性文献综述的主要目标是加深研究群体对所采用优化算法的理解，这些算法用于提出聚焦于智能电网成本效益与 Energy 管理的新型应用。我们重点研究了 PSO、GA 和 GWO，以比较基础、易于实施且灵活的仿生元启发式技术，并探讨其对环境、公用事业和用户的益处。我们的比较旨在展示优化技术的发展、其

表 I 优化算法、参数和术语的缩略语与关键词。

优化算法	
GA	遗传算法
PSO	粒子群优化
GWO	灰狼优化
术语和参数	
SGs	智能电网
MG	微电网
DG	分布式发电
DR	需求响应
PAR	峰均比
SLR	系统性文献综述
AI	人工智能
SVM	支持向量机
SM	智能电表
DSM	需求侧管理
HEM	家庭能源管理
EV	电动汽车

收敛速度、所能提供的最优结果，并找出哪种算法最为灵活，能够提供（最优/近似最优）结果。未来，我们计划将研究扩展至其他优化算法（即 ABC、ACO）。本文的贡献如下：

- 简要回顾优化算法（粒子群优化、遗传算法和灰狼优化算法）的概念与应用，以及智能电网中使用的术语（第二节）。
- 回顾智能电网的新型应用和特性，并介绍2011—2022年间发表的相关研究成果（第五节）。
- 汇集不同来源的统计数据，展示智能电网如何成为世界各国日益关注和投资的新兴领域（第五节）。
- 研究利用遗传算法、粒子群优化和灰狼优化算法实现智能电网成本最小化与能源管理的相关工作。我们以表格形式汇总相关研究，重点列出影响目标函数的目标函数、参数和约束条件（第五节）。
- 还重点介绍遗传算法、粒子群优化和灰狼优化算法中常用的优化算法，这些算法用于推导解决方案，以实现智能电网中高效的成本与能源管理（第五节）。
- 讨论优化经济高效的能源管理，以及利用最先进的优化算法监测网络攻击和物理攻击所面临的开放研究挑战（第六节）。

II. 背景

数字电力系统最早由 [21] 于20世纪最后十年提出。随着时间推移，为了让大范围互联电网系统（或称智能电网）更加可靠、可持续，人们不断取得新的进展。智能电网的定义因其用途、关注特性（即成本、可再生资源、管理、安全或用于构建智能电网的应用）以及

能源来源（电力或天然气）而异。本文聚焦于电力智能电网、其成本和能源管理。因此，我们将智能电网定义为：

“一组智能且互联的（双向，即物联网）网络和应用（即人工智能、机器学习（机器学习））协同工作，以实现电力的可行使用（根据消费者需求），维持可持续性，并确保/最大限度地提高从公用事业到用户端的经济型电力供应。”

智能电网的特性可能因部署区域（种群、地区或天气）、控制/预算电力资源的主管部门（私营部门、政府等）、相关信息以及用户/公用事业需求/储备而异，并据此加以改进。例如，美国利用用户的需求响应来管理电力浪费，并采用具有自愈能力的智能系统（可根据停电/故障自行调整），以防范网络/物理攻击 [22]。此外，鉴于智能电网的重要性，许多发达国家和欠发达国家都在投资这一领域，并利用分布式计算在实时模拟方面的知识，加强智能电网研究工作，为各地区的特定问题提供有益的解决方案。韩国 [23], [24], 中国 [25], [26], 新西兰 [27],[28], 北美 [29], 巴基斯坦 [30], 阿联酋及其他海湾国家 [31], 以及英国 [32]，都是在智能电网研究领域处于领先地位的国家。

随着使用智能电网（例如应对电力需求增长）的益处日益显现，研究人员指出，用户、公用事业或环境所面临的诸多挑战。这些挑战涉及环境健康（二氧化碳排放）、安全（网络与物理攻击）、能源管理和成本效益。尽管如此，针对上述所有问题和挑战，优化智能电网能够提供重要的解决方案。

A. 技术背景

本节将对本文综述中使用的一些技术术语进行准确概述。

微电网（*MG*）在连接到电网或脱离电网时，为用户提供使用自由度 [33]。需求响应（*DR*）是指终端用户改变电力使用需求（取决于高峰时段或低谷时段的电价，以及电力使用的日常规律）。
需求响应（DR）有助于监测电力使用情况，并为终端用户在高峰时段进行能源管理提供可行性 [34], [35]。分布式发电（DG）是指用于发电的先进技术（发电设施位于终端用户/消费者设施内或附近）。分布式发电包括太阳能电池板、风力涡轮机、水力发电厂等。 [36]。优化 是一种通过最大化或最小化给定目标函数，为特定问题寻求最佳拟合解的技术。智能电网中有多种用于优化的优化算法 [37]。在这篇系统性文献综述文章中，我们聚焦于遗传算法（GA） [38],粒子群优化

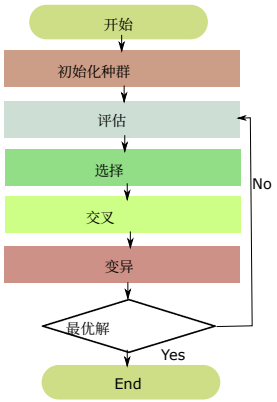

图 3. 遗传算法流程图

优化（PSO） [39],和灰狼优化 [40]算法。

遗传算法（GA）是一种仿生优化算法，其基础是生物遗传学的概念 [38]。该搜索算法结合了基因分裂（来自亲代）以及基因传递概率（传给后代）等自然现象，以寻找最佳／最优解 [41]。该算法利用一组个体（种群）及其特征（染色体），找出适应度最高的个体。其过程涉及基因（染色体中的单个性状／取值）的交叉和变异，以混合亲代之间的性状。每一代亲代种群都会繁殖，形成另一代后代种群，其适应度值和变异数量均高于亲代。这种进化算法会在每次迭代中改进参数值，并重复这一过程，直到满足／达到所需的终止条件（最优值）。图 3 展示了遗传算法的流程图。该算法以一组染色体种群或一组称为“代”的可能解决方案作为初始化种群。每代由各个个体的染色体组成，并通过评估来衡量其质量。从种群中随机选取个体后，利用交叉和变异改变其特征（染色体），以寻找最优解。该过程会重复进行，直至获得所需结果，且染色体中不再存在任何较弱的特征。

粒子群优化（PSO）受到群体行为与智能的启发，用于做出优化决策 [39], [42]。在 PSO 中，群体种群中的每个个体群以一定的速度移动，以寻找最优解。图 4 展示了 PSO 的流程图（即从初始化群体种群到找到最优解）。群体种群由以一定速度移动的单个粒子/群体组成，它们根据给定的目标函数搜索最合适的解。该算法评估每个粒子的适应度，找出适应度最佳的粒子作为最佳解（个体最优），并在每次迭代后更新全局最优解（全局最优），作为种群中的最优解。多目标粒子群优化（MoPSO）用于求解多目标问题，而

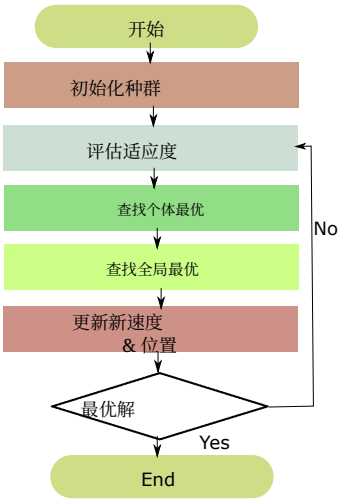

图 4. 粒子群优化算法流程图

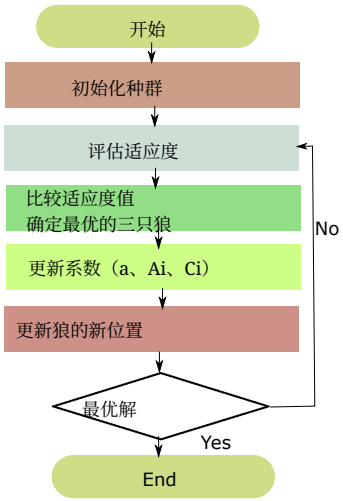

图 5. 灰狼优化流程图

PSO 仅用于一个目标函数。

灰狼优化（GWO）是另一种用于求解给定目标函数最优解的仿生技术 [40]。GWO利用灰狼的捕猎本性和社会领导特征。狼群中的四个层级群体（阿尔法、贝塔、德尔塔和欧米伽）被用于追踪和攻击猎物。最优解的寻找过程根据狼群在移动、追逐和/或攻击猎物时的群体特征来定义。图5展示了GWO的工作流程，从初始化每个灰狼群体（例如阿尔法、贝塔、德尔塔和欧米伽）的狼群种群开始。贝塔、德尔塔和欧米伽追逐最优解，并针对给定的优化问题确定三个最佳值（狼）。调优向量系数A和C决定狼群中的最佳狼。C 可以在每次迭代中更改为任意随机值，以探索更多解决方案，从而找到狼的最佳位置。另一方面，A 取决于a的值，即$-1 \leq a \leq 1$，以攻击猎物。A 的变化值有助于狼向相反方向移动（东/西；随着a 从-1变为1），而猎物位于中心0处。而i 表示群体中特定狼的编号。借助这种方法，狼可以在全局范围内搜索最优解。一旦找到最优解，狼就会相应地更新其系数和位置。

III. 文献综述

能源管理对于生活的方方面面都至关重要，有助于最大限度地减少能源损耗，并为用户和公用事业带来生态效益。需求侧管理（DSM）、公用事业能源控制、负荷转移，以及针对公用事业/用户的成本分析，都是控制和影响能源管理的重要因素 [43]。需求侧管理使用户能够减少功率/能源损耗（由焦耳效应导致）。负荷转移通过削平用户侧的能源峰值，增强了所用负荷的隐私性。将能源使用造成的总能源损耗或碳排放与为其支付的成本进行比较，有助于凸显能源管理在智能电网中的重要性。在特定情景下，意大利的一个普通家庭可节省 35,847 KWh 至 5,516,361 KWh [43]。此外，智能电网还具备多项优势，例如能源资源供应多样化、投资延期以及电能损耗降低等。

文献 [44] 对智能电网能源管理中各种优化技术进行了比较分析。作者指出，要实现高效通信、不同通信模块之间的数据交换以及优化，需要一个安全高效的电网。通过采用适当的优化方法，并对功率/能源资源进行合理配置和维护，可以减少利用损耗。此外，还可以提高电网的可靠性，同时最大限度地减少污染物排放和能源成本。作者综述了遗传算法、蚁群优化算法、粒子群优化、神经网络和模因算法在智能电网能源与成本优化方面的应用。他们得出结论，智能电网中的优化算法应用仍处于早期阶段，因此这一研究领域还需要开展更多工作。

为了降低不确定性并增强智能电网的稳定性，概率优化是用于家庭能源管理（HEM）、需求侧管理、微电网集成和经济调度问题的最流行、最先进的技术 [45]。[45] 的作者回顾了智能电力系统中不同概率优化技术的研究，并将其分为若干类别，具体包括随机优化、鲁棒优化、分布鲁棒优化和机会约束优化。对上述类别的分析表明，这些方法能够提供可靠的解决方案，但计算成本较高；鲁棒优化提供的解决方案更为保守，但计算成本较低。相比之下，分布鲁棒优化没有鲁棒优化那么保守。尽管如此，鲁棒优化仍是智能电网能源管理中最受欢迎的优化技术。智能电网中的家庭能源管理系统有助于监测和优化能源

流向用户的过程，同时考虑电力储能和智能家电。用于优化家庭能源管理系统的两种主要方法是模型预测控制（MPC）和强化学习（RL）。[46] 的作者对动态环境下的模型预测控制和强化学习方法进行了比较性综述。此外，他们还使用四块 DualSun 光伏板开展了案例研究。研究持续了两天，结果表明，建模和预测是模型预测控制的两大主要缺点。然而，强化学习作为一种无模型方法，相较于模型预测控制更具可行性；但在某些特定情况下，可能会导致控制不稳定。

文献 [47]中介绍了一项综述，用于评估三种常见的人工智能负荷预测方法（即长短期记忆网络、数据处理组方法和自适应神经模糊推理系统）的性能。该综述还在含噪条件下评估了长短期记忆网络模型。数据集被划分为训练集和测试集，用于研究这三种方法的影响；研究采用 MATLAB 计算均值和均方根误差（RMSE）。结果表明，与另外两种方法相比，长短期记忆网络模型的数据处理能力更强。研究还针对智能节能系统（2013-2019）开展了一项系统性文献综述 [48]。综述指出，在智能电网中建设新基础设施、采用新开发的策略并开展能源监测，有助于智慧城市的能源管理。此外，应用能源管理方法并实施新开发的能源管理技术，是实现能源节约的可行解决方案。

据我们所知，尚无系统性文献综述按照 [49] 指南，将遗传算法、粒子群优化和灰狼优化算法共同用于优化智能电网中的成本与能源管理作为研究范围（重点）。这篇文献综述具有创新性，因为它从四个研究数据库中筛选出高质量论文（发表于2011年—2022年），这些论文提出了应用和特征方面的新思路，以优化结果，并进一步阐述了智能电网的重要性。我们认为，本综述的研究成果对研究界至关重要，因为它遵循公正且广为认可的系统性文献综述开展指南。

IV. 文献综述：方法论

Kitchenham 和 Charters 于2007年提出了在软件领域开展系统性文献综述（SLR）的指南
工程 [49]。这些指南可应用于各种研究领域，以开展系统性文献综述。图6展示了综述分为三个阶段，各阶段又细分为若干子阶段。第一阶段是规划阶段，在此阶段提出若干研究问题，以说明开展系统性文献综述的动机或原因。第二阶段是实施阶段，在此阶段使用指定的术语、标准和评估工具进行检索，以回答提出的研究问题。最后，报告阶段用于将收集到的数据（即研究论文）整理成多种形式（例如文本、

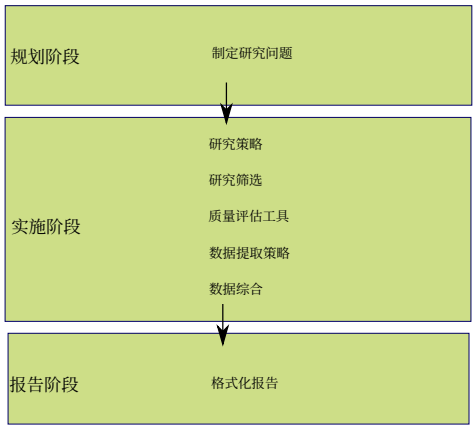

图 6。 Kitchenham 和 Charters 系统性文献综述阶段 [49]

图表、表格和/或图）。在接下来的章节中，我们将详细介绍本综述文章的检索方法。

A. 规划阶段

规划阶段是系统性文献综述的第一步，在此阶段我们会提出研究问题，以确定未来的研究方向。以下是为本综述拟定的研究问题：

- **研究问题1：** 智能电网有哪些应用？
- **研究问题 2：** 为什么智能电网是一个至关重要且前景广阔的研究领域？
- **研究问题 3：** 在智能电网中，为实现最优能源管理和高成本效益系统，采用了哪些目标函数/参数？
- **研究问题 4：** 遗传算法、灰狼优化算法和粒子群优化算法在提升智能电网的能源与成本管理方面应用得有多广泛？

B. 实施阶段

在实施阶段，我们按照以下各项步骤收集有用数据，并回答第 IV-A 节中提出的研究问题。

1) 搜索策略：数据收集基于术语，在2011年至2022年的不同资源所收录的文章中进行有针对性的检索。我们使用 Google Scholar、IEEE、爱思唯尔和 Springer 研究数据库检索已定义的术语。研究问题用于确定研究术语，检索范围为数据（即研究论文）的“标题”和“摘要”。此外，我们还借助“与”和“或”等高级搜索工具筛选检索结果。

2）搜索资源和搜索词：我们考虑以下研究资源，用于报告研究论文（即期刊和会议论文）：

1）谷歌学术 2）IEEE
Explorer 3）爱思唯尔/
Science Direct 4）
Springer

在 IEEE Explorer 中使用以下关键词，以获取2011年至2022年的结果：

- 遗传算法 与 智能电网与 人工智能。
- 粒子群优化与 智能电网 与 人工智能。
- 灰狼优化 与 智能电网与 人工智能。

以下关键术语用于在 Google Scholar 和 Springer 中检索2011年至2022年的结果（包含所有这些词、精确短语和至少一个词 为可选搜索条件）：

- 包含所有这些词：智能电网 精确短语：遗传算法，至少一个词：人工智能。
- 包含所有这些词：智能电网 精确短语：粒子群算法，至少一个词：人工智能。
- 包含所有这些词：智能电网 精确短语：灰狼算法至少一个词：人工智能。

以下关键词用于在ScienceDirect/爱思唯尔中获取2011年至2022年的结果：

- 利用人工智能的智能电网遗传算法（ScienceDi- rect/爱思唯尔）。
- 利用人工智能的智能电网粒子群优化（ScienceDirect/爱思唯尔）。
- 利用人工智能的智能电网灰狼优化（Sci- enceDirect/爱思唯尔）。

以下是四个研究资源中所使用的智能电网应用关键词：

- 智能电网的新颖应用。

我们从 IEEE 获得了总计 ∼107 篇相关文章，从 Springer 获得了 ∼21 篇，并从 Google Scholar 和爱思唯尔各获得了超过 ∼50 篇。由于检索到的研究成果数量庞大，其中部分内容与主题无关，我们按照下文第 IV-B3 节将介绍的系统性文献综述（SLR）研究筛选阶段，剔除了无关、冗余和信息量较低的研究成果。

3）研究筛选：本节介绍研究筛选所采用的技术，用于从大量研究成果中筛除所有原始及主题无关的文章。因此，我们制定了纳入/排除标准作为筛选机制，以便针对研究问题（见第 IV-A 节）找到准确、精确的答案。排除和纳入标准如下：

- **纳入：** 与智能电网中通过遗传算法/粒子群优化/灰狼优化算法实现成本效益和能源管理相关的文章（通过浏览论文了解其相关性）。
- **纳入：** 仅限以英语发表的文章。
- **纳入：** 被 Scopus 和 Scimago 收录的期刊及会议论文。
- **纳入：** 学习 GA、PSO 和 GWO 基础版本（未经增强版本）中的优化。
- **排除：** 书籍和书籍章节。
- **排除：** 重复相关思想或为相同问题提供解决方案，但采用优化智能电网以外的其他技术的文章。
- **排除：** 所有类型的综述论文。
- **排除：** 重复性研究论文、界定影响的研究论文，或对已发表文章进行案例研究的研究论文。

应用纳入和排除标准后，收集到的数据缩减至 ∼150 篇研究论文，而最终得出的信息则依据我们在下文第 IV-B4 节介绍的质量评估工具进行了完善。

4) 质量评估工具：为了评估从所有研究资源中收集的数据质量，研究中使用了质量评估工具来完善检索过程。应用质量评估工具后，仅从选定的 ∼150 论文中纳入最相关的论文。在此步骤中，共制定了 6 个质量评估问题。这些质量评估问题对于研究论文的评分和质量评估至关重要。每篇论文都依据全部问题进行评分，评分范围为 0 至 1。如果论文完整回答了质量评估问题，则得分为 1。如果研究论文部分回答了质量评估问题，则记为 0.5；对于回答质量评估问题时存在不完整或模糊观点的情况，则记为 0。对于 6 个质量评估问题，如果论文得分达到 3 分（满分 6 分），则将其纳入我们的 SLR；否则予以排除。我们严格按照质量评估工具的比例，从该领域大量已发表论文中纳入高质量文章。以下列表列出了我们采用的质量评估问题：

- **Q1：** 论文是否清楚地阐述了研究动机和贡献?
- **Q2：** 论文是否清楚地定义了目标函数和参数?
- **Q3：** 应用优化方法或所提出的算法后，是否报告了明确且有用的结果?
- **Q4：** 论文中提供的结果是否与基准进行比较（即针对相同问题陈述先前提出的技术）？
- **Q5：** 该问题陈述是否有助于智能电网的能源管理监测、降低成本函数或相关应用?
- **Q6：** 研究文章中的研究是否具有实际应用价值，且能够实施（例如，在工业或现实场景中）？

5）数据提取策略与数据综合：在此步骤中，利用最终收集的论文列表提取所需信息，以回答第 IV-A 节中的研究问题。提取的信息如下：

- 文章标题及其发表年份。
- 提出的目标函数和优化参数。
- 所提出解决方案中的假设。
- 文章的出版商。
- 针对智能电网能源管理和成本效益提出的解决方案。
- 智能电网提出的最先进应用。

收集的数据以图表、表格、图和文本的形式进行综合，并以更丰富、更具信息量的方式呈现，以回答研究问题。

C. 报告审查

成功从上述章节收集数据后，我们仔细、准确地撰写了综述，逐一回答每个研究问题。

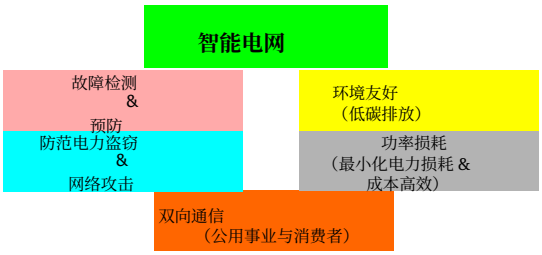

图 7. 智能电网的特征

V. 结果与讨论

本节回答 IV-A 中列出的研究问题。

A. 研究问题 *1*：智能电网有哪些应用？

智能电网部署市场的投资不断增长，得益于其在现实生活中的广泛应用和诸多优势。这些优势包括易于使用、设备调度、对公用事业和用户而言更经济、环境可持续性等，如图 7 所示。应用人工智能（人工智能）、优化算法和预测技术后，智能电网的这些优势会进一步提升。如今，人工智能凭借高效率、执行任务耗时少以及减少人工参与等特点，已应用于几乎所有市场和工业领域。智能电网中的优化有助于通过提供耐用且低成本的解决方案，实现可持续发展目标。应用于智能电网的预测技术有助于更多地利用可再生能源并进行能源管理。智能电网的一些应用包括稳定性分析、决策、损伤／攻击检测、预测、减少排放、能源管理和优化。图 8 展示了本综述讨论的智能电网新颖应用。下文将进一步提供有关智能电网特征和应用的证据。

稳定性分析在电网中是指向消费者提供可靠、持续、充足（满足需求）、安全、成本较低（对公用事业和用户而言）且不间断（无电压波动）的电力供应 [50]。与智能电网相比，传统电网不支持先进的稳定性分析。稳定性分析要求电力系统在频率和电压方面保持稳定，以维持平衡并提供高效的电力供应 [51]。W. Hu 等人提出了两种方法——激进支持向量机（ASVM）和保守支持向量机（CSVM），以提高电网稳定性检测的准确率 [52]。李生卷积支持向量机 [53]是提升稳定性的另一种方法。另一种稳定性预测混合方法结合轨迹拟合（TF）与极限学习机（ELM）开发而成 [54]。基于 ELM 的方法应用于公用事业区域，而 TF 则用于当地公用事业单位（地方发电站）。研究使用相关变量来记录电力系统中的前瞻性电压稳定性 [55]。此外，针对相量测量单元（ PMU ）的暂态稳定性，研究采用了一种基于决策树的方法 [56]。诸如哈密顿量被用于检测电力系统中的稳定性和不适宜性 [57]。代价敏感方法被用于计算暂态稳定性 [58]。此外，J.Q. James 等人提出了频率相关负荷功率和稳定平衡，并评估了电力系统中的电压稳定性 [59]。

决策 是智能电网中使用的另一种人工智能应用 [60]。集成了人工智能的节能应用，例如亚马逊 Alexa [61]，Samsung Smart things [62]，Apple Home [63]，Ecobee [64]，Google home [65]，等，可帮助监测智能家居以及家中各种电器的能源消耗。通过对设备/电器进行深入且自动化的监测，即使消费者很少与设备交互，也能实现能源管理。这些应用会学习住户的日常生活习惯，并通过高效决策按需安排负荷。文献 [66] 和 [67]介绍了利用基于知识（消费者日常习惯模式或偏好）的信息实现人工智能优化智能家居，以提高能源效率并保障用户舒适度。此外，研究人员利用先进人工智能开发了云分析辅助智能电表，用于智能家居的需求侧管理 [68]。智能电表/电网利用人工智能优化能源消耗与储能（面向消费者和公用事业）。决策依据一天中高峰/低谷时段的能源成本模式，以及用户首选的任务调度安排（电动汽车充电、执行其他家务）。

损伤/攻击检测与预测 是智能电网最重要的应用之一。智能电网中输电线路、设备和/或机械设备发生轻微损坏，都可能导致严重问题。例如，同步错误、数据窃取、电力供应中断、停电、整个电力系统故障，以及虚假数据的添加（网络攻击）。因此，检测损伤/攻击的位置至关重要，也应提出危机/损伤预测算法，以预测和评估可能发生的任何故障/攻击，确保及时检测故障。及时准确地检测智能电网中的损伤和攻击，有助于改善用户和公用事业的隐私，并防止电力系统发生大规模停电。可利用机器学习中的小波变换特征提取方法检测电网中的损坏/故障位置 [69]。A. Belhadi 等人提出了一种利用粒子群优化（PSO）进行故障检测（能源系统中的异常模式检测）的方法，以保护智能电网中的隐私 [70]。另一种异常检测方案被提出，用于检测大规模智能电网中的虚假数据注入攻击 [71]。[72] 中的作者提出了一种基于机器学习的异常检测方案。不列颠哥伦比亚水电系统的算法利用人工智能收集电压曲线相关性分析和电压幅值比较数据，以预测地理信息系统错误 [73]。S. Zhang 等人提出了一种用于电力系统的故障预测方法（长短期记忆网络和支持向量机） [74]。此外，L. Lin 等人提出了一种借助传感器检测风暴紧急情况下所致故障/损伤的方法，以及时确定故障位置 [75]。此外，[76]中的作者采用深度学习方法进行基于图像的表面损伤

检测，以识别可再生能源电网中的表面损伤。深度学习方法也用于理想智能电网中的输电线路损伤检测 [77]。A. Subasi 等人在智能电网中采用了入侵检测系统和数据挖掘技术 [78]。 [79] 中的作者提出了一种在智能电网中使用无模型强化学习（RL）的在线网络攻击检测算法。

神经网络被用于检测虚假数据注入攻击 [80] ，并缓解信息物理虚假数据攻击 [81]。采用优化模糊方法 [82]和基于布隆过滤器的攻击检测 [83]也可以减少网络攻击。研究人员开发了一种名为工业控制系统弹性安全技术（IREST）的信息物理传感器，用于检测由网络与物理扰动导致的异常 [84]。通过数据分析 [85] 和深度卷积神经网络（CNN） [86], 可以检测并减少窃电行为。PSO门控通过将用户划分为诚信类和欺诈类，减少了窃电行为 [87]。L. Zhang等人 使用基于PSO的支持向量机（SVM）检测智能电网中的异常 [88]。I. Parvez 等人 提出了一种有监督机器学习技术，利用用户的真实用电数据检测智能电表数据中的窃电行为 [89]。 [90]中的作者提出了一种机制，通过在公用事业与用户之间交换低电压、低成本数据（能源消耗统计数据），来检测智能电表（SM）中的小功率扰动以及智能电网中的网络级联故障 [91]。

预测有助于智能电网通过需求响应管理降低峰值电力负荷和成本，这是依赖于价格、负荷或可再生能源预测的一项关键任务。可靠的预测方法能够节省智能电网中的电力成本和功率。智能电网可以应用各种算法进行负荷和价格预测。负荷预测的时间范围可能从几分钟到许多年不等。许多技术已被提出用于负荷和价格预测。在本综述中，我们介绍近年来发表的新颖且先进的预测技术。 [92] 中的作者对能源消耗序列进行了预测，并使用遗传算法（GA）进行特征选择和超参数优化，以提高该机制的准确性。G. Hafeez 等人在 [93] 中提出了一种基于人工神经网络（ANN）的集成预测引擎框架，采用日前灰狼改进增强差分进化算法（DA-GmEDE）进行家庭能源管理和能源消耗预测。 [94] 中的作者应用支持向量机（SVM）预测智能电网中的电力负荷。 [95]提出了一种需求预测方法，采用支持向量回归（SVR）进行提前一小时的需求预测。M. Ali等人在 [96] 中提出了短期负荷预测算法，用于分析并缓解导致过载和需求曲线变化的干扰。在 [97], 中，作者提出了一种基于向量自回归框架的提前六小时预测算法，用于住宅太阳能光伏（PV）和二次变电站层面的预测。另一方面，可以使用多核极限学习机（MKELM）实现基于价格阈值的短期电价预测和分类 [98]。

同样，大数据也可用于智能电网中的电力负荷和价格预测，以根据用户需求确保市场的可靠性和电力管理 [99]。基于聚类分析的机器学习算法被证明能够有效改进智能电网中的能源消耗预测 [100]。E. Y. Shchetinin在 [101] 中使用卷积神经网络、基于神经网络的遗传算法（NNGA）和基于神经网络的粒子群优化（NNPSO）进行智能电网中的能源使用和需求预测。此外，对于概率性负荷预测，还采用了基于深度集成学习的方法，根据负荷不确定性对客户进行分类 [102]。通过将特征工程（FE）和改进萤火虫优化（mFFO）算法与支持向量回归（SVR）相结合，[103] 中的作者提出了FE-SVR-mFFO预测框架，用于智能电网。FE-SVR-mFFO用于稳定、可靠的负荷预测，以实现有效规划和安全的智能电网决策。L. Li等人使用基于深度学习的短期预测（DLSF）方法，采用深度卷积神经网络模型进行数据聚类，以实现电力负荷预测 [104]。

减少排放是指减少汽车碳排放和污染。可再生能源、优化方法和能源管理流程被广泛用于减少环境中的污染物。在 [105], 中，作者使用基于集成的闭环优化方案（EnOpt）来减少智能电网中的碳排放。该方案使用集成卡尔曼滤波器（EnKF）预测能源生产和用电过程中的碳排放。随后使用EnOpt优化预测得到的碳排放值。 [106] 中的作者使用粒子群优化（PSO）来降低可再生能源和插电式汽车的成本与排放。多目标风驱动优化（MOWDO）算法和多目标遗传算法（MOGA）被用于减少智能电网中的排放和运营成本 [107]。通过日前负荷转移和进化算法（EA）获得了减排的需求侧管理（DSM）优化结果 [108]。无线通信技术可用于管理家庭可再生能源发电，并采用功率削减算法来减少碳排放 [109]。通过 [110]提出的复杂多功能控制单元可以减少碳排放。

能源管理在智能电网中发挥着重要作用，可降低公用事业和用户的能源损耗及能源成本。智能电网是一种先进的电力网络，能够监测电力需求与供应，并管理相关任务，以满足用户在不同时段的能源需求。能源管理系统（EMS）和需求侧管理是解决电网能源管理问题的两种重要方案。以下是智能电网中一些常见的新型能源管理系统方法。MATLAB-Simulink-GUIDE工具箱用于智能电网的能源管理和家用电器管理 [111]。H. Taherian 等人在 [112]中提出了一种混合模型，利用智能电表用户的用电模式来调度家用电器。A. Manzoor 等人提出了一种用于智能电网需求侧管理的教师学习遗传优化（TLGO）混合技术，

见 [113]。混合整数线性规划（MILP）用于调度智能家电、安排电动汽车的充电/放电，以实现能源管理并降低能源成本 [114]。F. Kennel 等人在智能电网中采用了分层模型预测控制 [115]。研究人员开发了一种用于智能电网能源管理的基于共识的算法 [116]。文献 [117] 提出了一种斯塔克尔伯格博弈论框架，用于发电机和微电网的能源管理。自适应模糊逻辑模型（AFLM）和监督式模糊逻辑学习（SFLL）用于识别用户偏好并确定能源管理定价 [118]。文献 [119] 开发了一种混合随机/鲁棒优化方法，利用能源管理实现智能电网的整体成本最小化。分布式优化算法用于事件驱动能源管理 [120]。为降低住宅区的能源支出，文献 [121]提出了一种基于马尔可夫决策过程（MDP）的调度机制。W. Meng和X. Wang在智能电网中提出了一种基于非凸优化问题和拉格朗日对偶法的分布式能源管理算法（DEMA） [122]。

提出了一种物联网与基于云的能源管理系统，该系统利用客户的负荷曲线，使公用事业能够调整其能源消耗需求，并据此管理电力供应 [123]。P. Duan 等在 [124] 中，针对插电式混合动力电动汽车采用了分布式多层云雾计算架构进行能源管理。P. Duan 等还采用灰狼优化算法和蒙特卡洛模拟，以提高智能电网中需求管理的效率。研究提出了一种采用实体抽象层和通信抽象层的通用分层架构，用于能源管理 [125]。研究提出了一种利用比例-积分 (PI)、自适应神经模糊推理系统和镍氢电池实现可再生能源自动化的能源管理系统，用于储存多余能源 [126]。研究采用基于虚拟队列的松弛方法和随机对偶次梯度技术，实现由智能电网供电的协作多点的动态能源管理，以在最大限度管理能源的同时降低能源成本 [127]。 [128]中的作者提出了一种先进的建筑能源管理系统，该系统基于多智能体系统并采用粒子群优化，通过降低数据管理的复杂度并提高能源效率来最大限度地提升舒适度。

优化智能电网旨在降低成本。蒙特卡洛模拟和磷虾群优化算法被用于混合插电式电动汽车的成本最小化 [129]。研究提出了一种人工免疫算法（AIA），利用帕累托最优解解决多目标问题，即同时最小化运行成本和公用事业端的峰均比 [130]。整数线性规划（ILP）技术用于优化日负荷调度，以降低小时峰值负荷 [131]。研究利用本地地理信息，为智能电网中的大规模物联网开发了一种局部优化应急调度方案 [132]。L. Xu 等在 [133]中使用信息物理系统鲁棒路由模型，通过大M评估信息流方法。Y. Zhang 等提出了一种基于集合打包算法的信任系统，用于优化可信节点的位置、实现容错，并通过最优路由算法在智能电网多层架构中寻找最低成本方案 [134]。 [135]中的作者提出了一种用于智能电网需求侧管理优化的进化算法。L. Liu 和 Z. Han 在 [136] 中使用贝叶斯网络和分时，提出了负荷控制电力管理算法。研究采用禁忌搜索优化算法，通过在需求侧使用可控负荷（热泵、电动汽车等），以降低发电成本并最大化公用事业的项目收益 [137]。研究提出了一种混合整数非线性规划问题的解法，用于优化微电网中插电式电动汽车有功功率和无功功率交换的集中式鲁棒/随机方案 [138]。在 [139], 中，作者采用多目标混合整数线性规划，降低智能电网需求侧管理中的电力峰值负荷和电力成本。研究采用并行分布式优化方法，利用可再生能源分布式发电机降低通信的复杂度、成本和时间 [140]。研究采用基于云的智能电网信息管理和网络资源优化模型，分别使用混合整数线性规划和线性规划来最小化总成本 [141]。

提出了一种基于有限时间平均一致性算法和投影梯度的分布式经济调度机制，通过风力和火力发电机解决二次和非二次凸问题中的优化成本函数 [142]。提出了一种采用集中式和分布式模型预测控制的分布式优化算法，以最大限度地降低输送给住宅用户的功率方差 [143]。提出了一种基于优先级的优化交通调度方法，用于基于遗传算法的认知无线电网络智能电网，通过监测和建模数据（命令控制、电表读数和多媒体感知数据） [144]。采用模型预测控制技术制定最优控制策略，以优化中央空调系统，并根据用户需求响应降低预期功率 [145]。 [146] 中的作者提出了采用需求响应和遗传算法的客户激励定价方法，用于资源分配并最大化公用事业的利润。提出了一种水火电力公用事业公司的自主调度优化模型，该模型复杂度低、灵活性高，可供决策者（发电公司）使用 [147]。Z. A. Khan 等人提出了一种基于元启发式的家庭能源管理系统，采用增强型差分进化（EDE）和和声搜索算法（HSA）对智能家电进行调度，并优化能源消耗 [148]。提出了一种能源管理模型，利用发电量、能耗信息和混合整数线性规划（MILP），以降低智能家居中的电力成本 [149]。I. Atzeni 等人 重点研究需求侧分布式能源发电与储能的优化及联合优化问题，通过日前优化调度为用户提供最优发电和储能建议 [150]。采用萤火虫群优化（GSO）和支持向量机，通过负荷调度、重新调度和电价降低终端用户的能源成本 [151]。



图 8. 智能电网的应用

B. RQ2：为什么智能电网是一个至关重要且前景广阔的研究领域？

智能电网为用户和公用事业提供连接，并带来广泛的应用和益处。智能电网技术包括电力供应电网、可再生资源、高级计量、较低排放以及能源效率提升。由于在环境和经济方面均有益处，智能电网已成为研究人员关注的重要课题。全球许多地区，包括美洲、欧洲和亚洲，已成为增长最快的智能电网市场，用于制造、购买、销售和投资公用事业与用户之间的现代电力通信和供应。根据统计报告 [152], , 自 2017 年以来，全球电力网络（智能电网和智能电表）的年度投资不断增加，如图 9 所示。这些统计数据表明，与世界其他国家相比，美国、中国和欧洲国家在这一领域的投资更高。这些投资分别达到欧洲 ~56.7 亿美元、中国 ~82.6 亿美元和美国~77.1 亿美元。2021 年，美国安装了总计 1.15 亿台智能电表（比 2007 年多 1.08 亿台） [153]。此外，全球智能电网技术市场规模已从 ~36.9 亿美元（2021 年）增至 ~40.1 亿美元（2022 年），预计到 2026 年将达到 ~55.9 亿美元。

C. 研究问题 *3*：在智能电网中，用于实现最优能源管理／成本高效系统的目标函数／参数有哪些？

表 II、表 III 和表 IV 分别列出了使用遗传算法、灰狼优化算法和粒子群优化来实现经济高效的最佳能源管理时所采用的目标函数和参数。此外，表 IV 详细介绍了利用粒子群优化，通过智能电网中的能源管理技术降低能源成本的文章。收集的研究论文得出结论，通过调度/管理负荷、优化功率损耗和能源成本，以及利用额外的储能（若有），可以最大限度地降低能源成本。

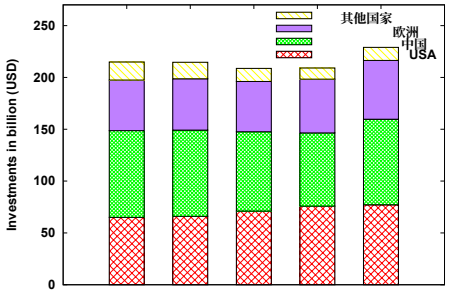

图 9. 智能电网和智能电表过去的年度投资

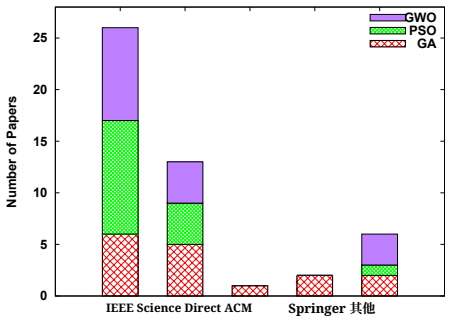

图 10. 研究资源中收录的研究论文数量（按年份统计）

然而，均方根误差和峰均比是能源管理中用于优化成本的最少用参数。图 10 展示了纳入研究问题 3 的相关文章所涉及的研究数据库（以及各数据库中的文章数量）。图 11 展示了纳入本综述的文章所用参数的详细信息。图中显示，成本函数是最常用于优化这些函数的工具。“其他”参数在图 11 中包括时间戳、时间函数、电流、负荷准确度、下垂参数、排放、变压器和电容器参数、延迟等。如图 11 所示，在智能电网中用于优化成本和能源管理问题的参数中，增益和吞吐量最少使用。

D. 研究问题 *4*：遗传算法、灰狼优化算法和粒子群优化在多大程度上被用于改善智能电网中的能源与成本管理？

图 12 展示了每年使用粒子群优化、遗传算法和灰狼优化算法优化智能电网中成本与能源的出版物数量。此外，图 13 以饼图形式展示了本综述所收录文章中各优化算法的使用比例。如上述图所示，与粒子群优化和灰狼优化算法相比，使用遗传算法作为优化算法的文章略多。

VI. 开放性研究挑战与未来方向

本节基于研究问题的分析结果，对本系统性文献综述进行分析。

表 II 智能电网中的遗传算法优化

文章	目标函数/动机	参数/约束
[154]	可再生能源的位置和容量	功率损耗、电压波动、能源供应和汽车电池维护成本
[155]	最小化总能源成本，预测发电与消耗，优化建模微电网	储能的能源成本和维护成本
[156]	最小化能源成本和用户不适	总成本、每小时成本和峰均比（PAR）
[157]	基于分时电价政策实现利润最大化	通过与电网进行能源交换获得的利润（时段和能源成本）
[158]	支持零售商为不同客户制定最优的日前动态定价决策，在可接受的能源消耗水平下最大限度地降低电费账单，	需求/消费者数量、电器/使用时间、消耗能量、与能源成本
[159]	最优 充放电 计划 of EVs （电池 电动汽车、插电式混合动力电动汽车）及定价时段	日行驶里程、充电器/功率容量以及低/高电价时段
[160]	最小化微电网能量损耗、购入能源总成本以及二氧化碳排放	负荷发电曲线、储能充放电计划，需求响应决策、可调度和不可调度分布式发电机组，投切电容器，以及从主电网购入的能源
[161]	平滑负荷曲线、降低峰值负荷、避免电力系统元件老化，以及电动汽车的充电与调度	电力系统投资成本、线路热稳定限值，以及变压器上的负荷变压器、电压限值，以及充电与停车可用模式
[162]	最小化智能电网的运行成本函数	来自公用电网的能源成本、负荷削减成本、挫折成本、不满意成本、电价时段、电池使用以及用户的经济收益
[163]	使用服务质量感知路由协议最小化智能电网的网络成本	丢包、路径损耗、有效吞吐量、网络可用性、关键网络、分组传输时延和连接中断概率
[164]	最小化电压控制和有功功率损耗	有功与无功功率等式约束、功率限制、电压限值、电容器级数限制和变压器分接比限制
[165]	通过需求侧管理和需求响应计划	经济调度、客户行为学习、价格和每小时负荷
[166]	能源消耗调度与预测	时间戳、功耗与功率损耗
[167]	需求侧管理、调节电压，以及智能负荷与功率的同步代发电曲线	电压、电流（交流/直流）、时域与功率
[168]	使智能电网的总运营成本最小化，并使利润最大化	功率、时间和成本
[169]	通过转移电动汽车的负荷来进行能源管理，以降低成本	时间、功耗、功率损耗和价格
[170]	以最低成本部署馈线母线用于分布式发电，并实现最高可靠性	未供电量和成本

表 III 智能电网中使用灰狼优化算法进行优化

文章	目标函数/动机	参数/约束
[171]	通过储能的最优配置来降低能源损耗	电池约束、电压、馈线电流容量和平衡功率
[172]	能源管理	成本函数、电力资源、充电与放电模式
[173]	优化以降低单位成本和碳排放	有功功率、二氧化碳排放与发电成本
[174]	能源管理	发电、用电、电池充电与放电
[175]	预防停电并最大限度降低成本	发电、电压、并联电容器/电抗器以及变压器分接比
[176]	功率调度	容量功率限制率、等待时间、功率和高峰时段
[177]	使用智能电池进行功率调度	电器的成本、峰均比、功率和等待时间
[178]	降低功率损耗，调节电压稳定性	分布式发电下垂参数、分布式发电的位置和容量单元、电容器、输电线路和可再生能源资源
[179]	降低发电成本、减少排放	燃料成本、功率损耗和排放
[180]	能源管理系统与成本降低	成本、发电和能源使用时间
[181]	微电网的功率调度，最大限度降低运行成本和功率损耗成本，减少污染物排放，功率损耗成本	负载/需求能量、成本和储能
[182]	优化并联直流（电流）-直流转换器，以分配负荷不同转换器之间的需求	均方根误差、延迟、电压、电流和时间
[183]	利用能源管理系统缩短运行时间	峰均比、消耗能量、发电量和负载定价
[184]	最大限度降低发电成本并减少排放	气体排放、功率损耗、燃料和总成本
[185]	孤岛微电网的能源管理与分布式能源资源	气体排放、电池充放电、维护和运营成本
[186]	价格和负荷预测	负荷准确度与电价

表 IV 智能电网中的粒子群优化

文章	目标函数/动机	参数/约束
[187]	利用需求响应管理降低消费者端的成本—— ment	总消费成本、定价时段及成本，以及消耗的能源
[188]	使用 Energy 进行电网的能源资源管理与日前调度 电动汽车	电压、热极限、电池储能限制、电池充放电 以及能源发电成本
[189]	能源资源管理与购电成本最小化 有功和无功功率发电、电池充放电	容量、时间和成本
[190]	最小化能源总输入	所需总能源输入、输电损耗、需求缺口， 以及传输介质温度变化
[191]	能源资源管理与能源资源调度	成本、能源成本、功率和电池充放电限制
[192]	用户均衡、公用事业利润与家庭能源管理系统	电器的启动时间和使用时长，以及功率（基线和 消耗）曲线
[193]	结合以下资源，尽量降低微电网的运行成本： 可再生资源	总能源与运行成本（燃料成本、维护和运行 分布式发电的成本）、主电网运行成本、启动或停机 降低燃料电池的成本，和微型燃气轮机的成本
[194]	通过优化能源混合降低可再生能源电网的日常成本 率、能量平衡和防孤岛约束	输出功率、能源混合率因子和电力成本
[195]	公用事业与用户之间的最优能源路径，以尽量降低能源和 成本损失	路径时延、成本和路径质量
[196]	通用住宅的需求响应优化方法 以最大限度降低每日成本	能源买卖成本、功耗和合同 电力成本
[197]	能源资源调度	能源市场价格、负荷、发电量、每日时间和日期，以及 天气预报
[198]	最大限度降低运行成本	发电、母线电压、有功和无功发电机组， 以及热极限
[199]	最大化利润	最大/最小输出功率和功率平衡、爬坡/下降速率， 电池充电/放电以及负荷信息
[200]	通过需求响应调度最小化运行成本	二次能耗成本函数、功率和负荷
[201]	高级计量基础设施的价格响应型需求灵活性 （微电网）	能源价格（价格波动）、能源需求和能源预测 值
[202]	用于最小化的分布式能源资源最优配置与容量 cost	电池充放电、负荷以及能源可用值/使用值

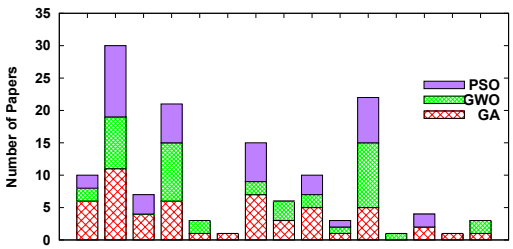

图 11. 优化技术使用的参数

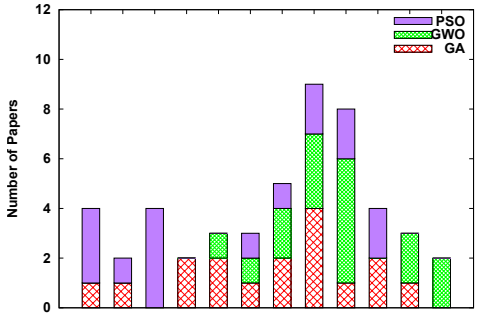

图 12. 每年使用这些算法的研究论文

问题。如前所述，研究人员已探讨智能电网的诸多特性和应用（即调度、管理、人工智能和物联网）。然而，随着智能电网变得更加便于应用，其面临的网络与物理攻击风险也日益增加。这些攻击可能针对智能电网的监控和建模，也可能侵犯用户隐私（例如用户的工作时间、用户是否在家，以及用户用来监控电压模式的设备）。电器调度和能源管理也引发了相关担忧

涉及信息泄露、用户不适，和/或高峰时段的电器使用。预测和损伤检测是智能电网的其他重要常见特性和应用。攻击者可能滥用预测信息，推测消费者未来是否在家、在工作，甚至推断电器的功率损耗。接下来的段落将讨论我们深入分析本系统性文献综述所纳入研究论文后归纳出的研究挑战。这些研究挑战分为：

- 网络与物理攻击和损伤检测。
- 监测与建模。

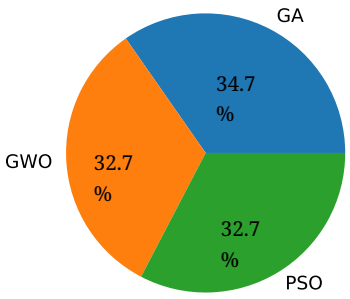

图 13. 各优化算法纳入的研究论文

- 哪种优化算法?

网络与物理攻击发生于公用事业与用户之间交换的数据安全性不足时。此外，如果不受信任的第三方有能力访问、读取、复制或修改数据，也会发生此类攻击。许多研究工作致力于缓解智能电网中的网络攻击，例如 [72]，[79]，[81]–[83]。提出的入侵检测系统借助数据挖掘技术、强化学习模型、深度学习和基于模糊逻辑的方法进行设计。智能电网中的物理攻击检测与网络攻击检测同样重要。采用一种强大的技术，同时检测网络与物理攻击的算法，可降低计算、检测和处理所需的延迟与时间，从而以更低的成本应对攻击。然而，只有少数研究论文（如 [80] ）采用神经网络进行网络物理虚假数据攻击检测。D. L. Marino 等人在 [84]提出了用于检测网络物理攻击的传感器，以减少异常。因此，与检测网络攻击或物理攻击相比，同时检测、预防或缓解网络与物理攻击的研究工作所占比例较低。

广域网（WAN）用于数据交换，任何人都可以通过物理方式访问。冒充合法用户的攻击者也可能通过广域网中的通信信道访问数据流。因此，攻击者可能会通过发起拒绝服务攻击，或注入虚假信息伪造合法电力买家的账单收据，造成负面影响。同样，在无线介质中，发射节点、通信信道和接收节点都面临着极高的被入侵风险。在这类情况下，研究人员必须考虑提出安全的硬件方案，并实施有效、安全的设计来感知攻击（相较于基于理论的研究）。还应将优化算法用于入侵检测系统，以降低检测成本与确保用户和公用事业之间安全信息交换之间的权衡。通过在本系统性文献综述中分析入侵检测系统相关技术，我们得出结论，大多数研究工作都与理论应用和攻击检测系统有关。因此，未来的研究工作在提出攻击／损伤检测方案时，应考虑真实数据和实际场景。

智能电网的监测与建模 在彼此互联（即智能电网物联网）时具有广泛的应用。要同时监测如此大量互联至电网的设备或电器，是一项颇具挑战的任务，且失败风险很高。传统监测需要在智能电网中进行数据同步；然而，随着需求增长，出现了更多需要持续（广域/远距离）连接和监测的应用。监测不仅限于数据同步，还涉及系统服务方面的性能分析、稳定性分析，以及保障能源/数据流的安全。适当的监测将推动智能电网建模领域取得更多进展。应广泛采用人工智能、大数据、数据挖掘和机器学习技术，对电器、路径、能源以及电力系统服务进行监测和建模。准确、及时地检测威胁，将缩小安全通信与能源供给不足和/或低于平均水平的服务之间的差距。通过利用监测设备、环境、资源以及需求所收集的所有信息，可借助人工智能应用和/或机器学习技术，构建一个高效且有效的新系统。

哪种优化算法? 智能电网中广泛使用了优化技术。如研究问题 4 所述，粒子群优化是最常用于获得预期结果的优化算法。在比较遗传算法和粒子群优化这两种算法时，我们得出结论：与遗传算法相比，粒子群优化具有诸多优势，例如所用参数较少 [203]。因此，在优化结果时，粒子群优化优于遗传算法。灰狼优化算法于2014年问世；作为一种新近开发的优化算法，灰狼优化算法易于使用、灵活，且与遗传算法和粒子群优化相比能够提供最准确的结果，因此正日益受到青睐并得到广泛应用。事实上，灰狼优化算法因收敛速度快、搜索空间更大而被认为是最有效的算法。

VII. 结论

这项系统性文献综述有助于发现能源管理领域的新颖应用和高质量研究成果，并认识到在现实场景中采用智能电网的重要性。我们遵循B. Kitchenham和S Charters在 [49]提出的系统性文献综述指南，回顾了过去10年的研究成果，以提升综述主题的研究质量并获取高质量资料。本文讨论了智能电网的主要应用（如稳定性分析、预测、决策、损伤/攻击检测、能源管理、减少排放和优化）。随后，本综述探讨了提出的不同研究问题，并提出了供未来研究人员考虑和研究的不同研究主题。

参考文献

[1] Muhammad Raisul Alam、Mamun Bin Ibne Reaz和Mohd Alaud- din Mohd Ali。《智能家居综述——过去、现在与未来》。IEEE系统、人类与控制论汇刊C辑（应用与评论），42(6):1190–1203，2012年。[2] Zhongcheng Li和Tong Yao。《基于智能电网的可再生能源》。载于《2010年第6届无线通信、网络与移动计算国际会议（WiCOM）》，第1–4页。IEEE，2010年。[3] Ye Yan、Yi Qian、Hamid Sharif和David Tipper。《智能电网通信基础设施综述：动因、要求与挑战》。IEEE《通信调查与教程》，15(1):5–20，2012年。[4] Vehbi C. Gungor、Dilan Sahin、Taskin Kocak、Salih Ergut、Concettina Buccella、Carlo Cecati和Gerhard P. Hancke。《智能电网技术：通信技术与标准》。IEEE工业信息学汇刊，7(4):529–539，2011年。[5] Kun Wang、Jun Yu、Yan Yu、Yirou Qian、Deze Zeng、Song Guo、Yong Xiang和Jinsong Wu。《能源互联网综述：架构、方法与新兴技术》。IEEE《系统期刊》，12(3):2403–2416，2017年。[6] Wenye Wang、Yi Xu和Mohit Khanna。《智能电网通信架构综述》。计算机网络，55(15):3604–3629，2011年。[7] Ejaz Ul Haq、Huarong Xu、Liang Pan和Muhammad Irfan Khattak。《智能电网安全：威胁与解决方案》。载于《2017年第13届语义、知识与网格国际会议（SKG）》，第188–193页，2017年。[8] Sanjay Goel和Yuan Hong。《智能电网实施中的安全挑战》。载于《智能电网安全》，第1–39页。Springer，2015年。[9] Suleyman Uludag、King-Shan Lui、Wenyu Ren和Klara Nahrstedt。《智能电网中安全且可扩展的数据收集与时间最小化》。IEEE智能电网汇刊，7(1):43–54，2015年。[10] Daojing He、Sammy Chan和Mohsen Guizani。《面向智能电网监测的无线传感器网络网络安全分析与防护》。IEEE《无线通信》，24(6):98–103，2017年。[11] Michele Moretti、S Njakou Djomo、Hossein Azadi、Kristof May、Kristof De Vos、Steven Van Passel和Nele Witters。《智能电网环境与经济影响的系统综述》。《可再生与可持续能源评论》，68:888–898，2017年。[12] C´edric Clastres。《智能电网：迈向竞争、能源安全与气候变化目标的又一步》。《能源政策》，39(9):5399–5408，2011年。[13] Qifen Dong、Li Yu、Wen-Zhan Song、Lang Tong和Shaojie Tang。《用于优化智能电网社会福利的分布式需求与响应算法》。载于《2012年IEEE第26届并行与分布式处理研讨会》，第1228–1239页。IEEE，2012年。[14] Singiresu S Rao。《工程优化：理论与实践》。John Wiley & Sons，2019年。[15] John S. Vardakas、Nizar Zorba和Christos V. Verikoukis。《智能电网需求响应计划综述：定价方法与优化算法》。IEEE《通信调查与教程》，17(1):152–178，2015年。[16] Ahmad Faiz Minai和Hasmat Malik。《可再生能源系统的元启发式范式：优化算法的进展》。载于《元启发式与进化计算：算法与应用》，第35–61页。Springer，2021年。[17] S Surender Reddy、Vuddanti Sandeep和Chan-Mook Jung。《智能电网随机优化方法综述》。《能源前沿》，11(2):197–209，2017年。[18] Ashish Ranjan Hota、Mahesh Juvvanapudi和Prabodh Bajpai。《插电式混合动力汽车接入智能电网的问题与解决方案》。《可再生与可持续能源评论》，30:217–229，2014年。[19] Rim Marah和Abdelaaziz El Hibaoui。《智能电网管理算法》。Sustainable Cities and Society，38:627–635，2018年。[20] Dionysia Kolokotsa、Nikos Kampelis、Angeliki Mavrigiannaki、Marco Gentilozzi、Filippo Paredes、Fabio Montagnino和Luca Venezia。《智能电网中的储能集成：技术与应用》。《能源储存》，1(1):e50，2019年。[21] MeiShengwei LuQiang。《大规模电力系统崩溃防治与优化运行重大科学问题的基础研究》。《中国基础科学》，1999年。[22] Yanshan Yu、Jin Yang和Bin Chen。《中国智能电网综述》。《能源》，5(5):1321–1338，2012年。[23] Daphne Ngar-yin Mah、Johannes Marinus van der Vleuten、Jasper Chi- man Ip 和 Peter Ronald Hills。《社会技术系统转型的治理：韩国智能电网发展的案例研究》。《能源政策》，45:133–141，2012年。[24] Taisiya Kim、Soo Kyung Park 和 Bong Gyou Lee。《智能电网业务的适当策略是什么？：韩国测试平台案例研究》。载于《2010年第五届普适信息技术与应用国际会议论文集》，第1–5页。IEEE，2010年。[25] Jiahai Yuan、Jiakun Shen、Li Pan、Changhong Zhao 和 Junjie Kang。《中国的智能电网》。《可再生与可持续能源评论》，37:896–906，2014年。[26] Xuan Zhu、Xiao-qing Han、Wen-ping Qin 和 Peng Wang。《中国微电网的过去、现状与未来发展》。《可再生与可持续能源评论》，42:1453–1463，2015年。[27] Nirmal-Kumar C Nair 和 Lixi Zhang。《智能电网：新西兰电力系统融入分布式发电的未来网络》。《能源政策》，37(9):3418–3427，2009年。[28] Janet Stephenson、Rebecca Ford、Nirmal-Kumar Nair、Neville Watson、Alan Wood 和 Allan Miller。《新西兰智能电网研究——绿色电网研究计划综述》。《可再生与可持续能源评论》，82:1636–1645，2018年。[29] Jonathan Wang、Mustafa Biviji 和 W Maria Wang。《北美智能电网需求响应计划案例研究》。载于 ISGT 2011，第1–5页。IEEE，2011年。[30] Muhammad Irfan、Jamshed Iqbal、Adeel Iqbal、Zahid Iqbal、Raja Ali Riaz 和 Adeel Mehmood。《智能电网控制中的机遇与挑战——巴基斯坦视角》。《可再生与可持续能源评论》，71:652–674，2017年。[31] ˙Islam S¸afak Bayram 和 Hamed Mohsenian-Rad。《海湾合作委员会地区智能电网概述》。《Smart City 360》，第301–313页，2016年。[32] Peter M Connor、Philip E Baker、Dimitrios Xenias、Nazmiye Balta- Ozkan、Colin J Axon 和 Liana Cipcigan。《英国智能电网的政策与监管》。《可再生与可持续能源评论》，40:269–286，2014年。[33] Zhang Jian、Ai Qian、Jiang Chuanwen、Wang Xingang、Zheng Zhanghua 和 Gu Chenghong。《多智能体系统在微电网协调控制中的应用》。载于《2009年可持续电力发电与供应国际会议》，第1–6页。IEEE，2009年。[34] Michael Lee、Omar Aslam、Ben Foster、David Kathan、Jordan Kwok、Lisa Medearis、Ray Palmer、Pamela Sporborg 和 Michael Tita。《需求响应与高级计量评估》。美国联邦能源监管委员会，技术报告，2013年。[35] Severin Borenstein、Michael Jaske 和 Arthur Rosenfeld。《电力市场中的动态定价、高级计量与需求响应》。2002年。[36] 分布式发电。美国环境保护署。https://www.epa.gov/energy/，2022年。[在线；访问日期：4月15日-2022]。[37] Murat Ahat、Soufian Ben Amor、Marc Bui、Alain Bui、Guillaume Gu´erard 和 Coralie Petermann。《智能电网与优化》。2013年。[38] John H Holland。《自然与人工系统中的适应：生物学、控制与人工智能应用导论》。麻省理工学院出版社，1992年。[39] Riccardo Poli、James Kennedy 和 Tim Blackwell。《粒子群优化》。《群体智能》，1(1):33–57，2007年。[40] Seyedali Mirjalili、Seyed Mohammad Mirjalili 和 Andrew Lewis。《灰狼优化器》。《工程软件进展》，69 61，2014 46: –。[41] Manoj Kumar、Mohammad Husain、Naveen Upreti 和 Deepti Gupta。《遗传算法：综述与应用》。SSRN，文献编号3529843，2010年。[42] James Kennedy 和 Russell Eberhart。《粒子群优化》。载于《ICNN'95国际神经网络会议论文集》，第4卷，第1942–1948页。IEEE，1995年。[43] Rosario Miceli。《能源管理与智能电网》。《能源》，6:2262–2290，2013年4月。[44] Sabeeh Ahmad Malik、Taimoor Muzaffar Gondal、Sadiq Ahmad、Muhammad Adil 和 Rizwan Qureshi。《智能电网优化方法综述》。载于《2019年第二届计算、数学与工程技术国际会议（iCoMET）》，第1–5页。IEEE，2019年。[45] Muhammad Riaz、Sadiq Ahmad、Irshad Hussain、Muhammad Naeem 和 Lucian Mihet-Popa。《智能电力系统中的概率优化技术》。《能源》，15(3):825，2022年。

[46] Sonja Kallio 和 Monica Siroux。《综述——智能电网中的家庭可再生能源管理系统》。IOP《地球与环境科学会议系列》，1050(1):012001，2022年7月。[47] Sirus Salehimehr、Behrooz Taheri 和 Mostafa Sedighizadeh。《利用人工智能方法进行智能电网短期负荷预测：综述》。《工程学杂志》，2022年。[48] Hakpyeong Kim、Heeju Choi、Hyuna Kang、Jongbaek An、Seungkeun Yeom 和 Taehoon Hong。《智能节能系统的系统性综述：从智能家居到可持续智慧城市》。《可再生与可持续能源评论》，140:110755，2021年。[49] B. Kitchenham 和 S Charters。《软件工程系统性文献综述实施指南》，2007年。[50] Lokman H Hassan、M Moghavvemi、Haider AF Almurib 和 Otto Steinmayer。《神经网络在电力系统监测与控制中的应用现状》。《International Journal of Electrical Power & Energy Systems》，51:134–144，2013年。[51] Yan Xu、Zhao Yang Dong、Jun Hua Zhao、Pei Zhang 和 Kit Po Wong。《用于电力系统实时动态安全评估的可靠智能系统》。《IEEE电力系统汇刊》，27(3):1253–1263，2012年。[52] Wei Hu、Zongxiang Lu、Shuang Wu、Weiling Zhang、Yu Dong、Rui Yu 和 Baisi Liu。《基于改进型支持向量机的电力系统实时暂态稳定性评估》。《现代电力系统与清洁能源期刊》，7(1):26–37，2019年。[53] Alireza Bashiri Mosavi、Ali Amiri 和 Hadi Hosseini。《利用孪生卷积支持向量机实现不受规模和类型影响的电力系统暂态稳定性预测学习框架》。《IEEE Access》，6:69937–69947，2018年。[54] Yi Tang、Feng Li、Qi Wang 和 Yan Xu。《基于两阶段计算资源的电力系统暂态稳定性预测混合方法》。《IET发电、输电与配电》，12(8):1697–1703，2018年。[55] Saeed Nejadfard-jahromi 和 Mohammad Mohammadi。《利用相关变量对电力系统进行数据驱动的前瞻性电压稳定性评估》。《IET发电、输电与配电》，2022年。[56] Tohid Behdadnia、Yusuf Yaslan 和 Istemihan Genc。《一种利用混合仿真和实时PMU测量数据进行决策树暂态稳定性评估的新方法》。《IET发电、输电与配电》，15(4):678–693，2021年。[57] Emanuelle Machado 和 Jose Eduardo Onoda Pessanha。《用于直接分析电力系统暂态稳定性的哈密顿能量平衡法》。《IET发电、输电与配电》，13(10):1895–1905，2019年。[58] Huaiyuan Wang、Qifan Chen 和 Baohui Zhang。《基于代价敏感方法的暂态稳定性评估组合模型框架》。《IET发电、输电与配电》，14(12):2256–2262，2020年。[59] JQ James、David J Hill、Albert YS Lam、Jiatao Gu 和 Victor OK Li。《智能时间自适应暂态稳定性评估系统》。《IEEE电力系统汇刊》，33(1):1049–1058，2017年。[60] Knud Erik Skouby 和 Per Lynggaard。《由5G、物联网、AAI和CoT服务赋能的智能家居与智慧城市解决方案》。载于《2014年当代计算与信息学国际会议（IC3I）》，第874–878页。IEEE，2014年。[61] 亚马逊 Alexa。https://developer.amazon.com/en-US/alexa，2022年。[在线；访问日期：9月9日-2022]。[62] Samsung smart things。https://www.smartthings.com/，2022年。 [在线；访问日期：9月9日-2022]。[63] Apple Home。https://www.apple.com/ae/ios/home/，2022年。 [在线；访问日期：9月9日-2022]。[64] Ecobee。https://www.ecobee.com/en-us/，2022年。 [在线；访问日期：9月9日-2022]。[65] Google Home 应用。https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.apps.chromecast.app&hl=en&gl=US，2022年。[在线；访问日期：9月9日-2022]。[66] Christian Reinisch、MarioJ Kofler、F´elix Iglesias 和 Wolfgang Kast- ner。《ThinkHome：未来智能家居中的能源效率》。《EURASIP嵌入式系统期刊》，2011:1–18，2011年。[67] Wolfgang Kastner、Mario J Kofler 和 Christian Reinisch。《利用人工智能打造既节能又舒适的智能家居》。载于《2010年IEEE工厂通信系统国际研讨会论文集》，第169–172页。IEEE，2010年。[68] Yung-Yao Chen、Yu-Hsiu Lin、Chia-Ching Kung、Ming-Han Chung 和 I-Hsuan Yen。《云分析的设计与实现——在智能家居需求侧管理中，将先进人工智能作为边缘分析应用的辅助型智能电表。传感器，19(9):2047，2019年。[69] Md Shafiullah、Mohammad A Abido 和 Zakariya Al-Hamouz。用于配电网故障定位的基于小波的极限学习机。《*IET*发电、输电与配电》，11(17):4256–4263，2017年。[70] Asma Belhadi、Youcef Djenouri、Gautam Srivastava、Alireza Jolfaei 和 Jerry Chun-Wei Lin。用于智能电网故障检测的隐私强化学习。《*Ad Hoc Networks*》，119:102541，2021年。[71] Hadis Karimipour、Sandra Geris、Ali Dehghantanha 和 Henry Leung。面向大规模智能电网的智能异常检测。载于*2019*年*IEEE*加拿大电气与计算机工程会议（*CCECE*），第1–4页。IEEE，2019年。[72] Prem Kumar Reddy Shabad、Abdulmueen Alrashide 和 Osama Mohammed。使用机器学习检测智能电网中的异常。载于*IECON 2021—IEEE*工业电子学会第*47*届年会，第1–8页。IEEE，2021年。[73] Wenpeng Luan、Joshua Peng、Mirjana Maras、Joyce Lo 和 Brian Harapnuk。用于验证配电网络连接性的智能电表数据分析。*IEEE*智能电网汇刊，6 1971，2015 4 1964( ): –。[74] Senlin Zhang、Yixing Wang、Meiqin Liu 和 Zhejing Bao。利用长短期记忆网络和支持向量机进行基于数据的电力系统线路跳闸故障预测。*IEEE Access*，6:7675–7686，2017年。[75] Lan Lin、Aldo Dagnino、Derek Doran 和 Swapna S Gokhale。电力公用事业风暴规划的数据分析。2014年。[76] ASM Shihavuddin、Mohammad Rifat Ahmmad Rashid、Md Hasan Maruf、Muhammad Abul Hasan、Mohammad Asif ul Haq、Ratil H Ashique 和 Ahmed Al Mansur。使用统一深度学习方法对可再生能源设施进行基于图像的表面损伤检测。《*Energy Reports*》，7:4566–4576，2021年。[77] Yangyang Tian、Qi Wang、Zhimin Guo、Huitong Zhao、Sulaiman Khan、Wandeng Mao、Muhammad Yasir 和 Jian Zhao。一种用于智能电网受损电力线路检测的混合深度学习与集成学习机制。《*Soft Computing*》，第1–9页，2021年。[78] Abdulhamit Subasi、Khloud Al-Marwani、Reem Alghamdi、Aisha Kwairanga、Saeed M Qaisar、Malak Al-Nory 和 Khulood A Rambo。使用数据挖掘技术检测智能电网中的入侵。载于*2018*年第*21*届沙特计算机学会全国计算机会议（*NCC*），第1–6页。IEEE，2018年。[79] Mehmet Necip Kurt、Oyetunji Ogundijo、Chong Li 和 Xiaodong Wang。智能电网在线网络攻击检测：一种强化学习方法。*IEEE*智能电网汇刊，10(5):5174–5185，2018年。[80] Yufeng Wang、Wanjiao Shi、Qun Jin 和 Jianhua Ma。一种基于残差循环神经网络和自适应阈值的智能电网虚假数据精准检测方法。载于*2019*年*IEEE*国际能源互联网会议（*ICEI*），第499–504页。IEEE，2019年。[81] Erik M Ferragut、Jason Laska、Mohammed M Olama 和 Ozgur Ozmen。使用神经网络实时检测智能电网中的网络物理虚假数据攻击。载于*2017*年国际计算科学与计算智能会议（*CSCI*），第1–6页。IEEE，2017年。[82] Saif Ahmad 和 Z Baig。用于有效检测智能电网网络攻击的基于模糊逻辑的优化。《*Int. J. Smart Grid Clean Energy*》，1(1):15–21，2012年。[83] Saranya Parthasarathy 和 Deepa Kundur。基于布隆过滤器的智能电网监控与数据采集系统入侵检测。载于*2012*年第*25*届*IEEE*加拿大电气与计算机工程会议（*CCECE*），第1–6页。IEEE，2012年。[84] Daniel L Marino、Chathurika S Wickramasinghe、Kasun Amarasinghe、Hari Challa、Philip Richardson、Ananth A Jillepalli、Brian K Johnson、Craig Rieger 和 Milos Manic。智能电网中的网络与物理异常检测。载于*2019*年韧性周（*RWS*），第1卷，第187–193页。IEEE，2019年。[85] Md Hasan、Rafia Nishat Toma、Abdullah-Al Nahid、MManjurul Islam、Jong-Myon Kim 等。智能电网系统中的窃电检测：一种基于卷积神经网络-长短期记忆网络的方法。《能源》，12(17):3310，2019年。[86] Hossein Mohammadi Rouzbahani、Hadis Karimipour 和 Lei Lei。一种用于智能电网窃电检测的集成深度卷积神经网络模型。载于*2020*年*IEEE*国际系统、人类与控制论会议（*SMC*），第3637–3642页。IEEE，2020年。

[87] Ashraf Ullah、Nadeem Javaid、Adamu Sani Yahaya、Tanzeela Sultana、Fahad Ahmad Al-Zahrani 和 Fawad Zaman。一种利用基于智能天线的智能电表检测窃电的混合深度神经网络。*Wireless Communicationsand Mobile Computing*，2021，2021年。[88] Leping Zhang、Lu Wan、Yong Xiao、Shuangquan Li 和 Chengpeng Zhu。一种基于GMM-LDA聚类特征学习和粒子群优化支持向量机的智能电表数据异常检测方法。载于*2019 IEEE*可持续电力与能源会议（*ISPEC*），第2407–2412页。IEEE，2019年。[89] Imtiaz Parvez、Arif I Sarwat、Longfei Wei 和 Aditya Sundararajan。智能电网计量基础设施安全：一种基于机器学习和定位的密钥管理方法。《能源》，9 691，2016 9( ):。[90] Wilson L Rodrigues Junior、Fabbio AS Borges、Artur F da S Veloso、Ricardo de AL Rabˆelo 和 Joel JPC Rodrigues。用于监测智能电网电能质量扰动的低压智能电表。*Measurement*，147:106890，2019年。[91] Neeraj Kumar Singh 和 Vasundhara Mahajan。利用先进灰狼优化检测智能电网变电站中的网络级联故障。*Journalof InterdisciplinaryMathematics*，23 79，2020 1 69( ): –。[92]Diogo MF Izidio、Paulo SG de Mattos Neto、Luciano Barbosa、Joˆao FL de Oliveira、Manoel Henrique da N´obrega Marinho 和 Guilherme Ferretti Rissi。用于智能电表能源消耗预测的进化混合系统。《能源》，14(7):1794，2021年。[93] Ghulam Hafeez、Khurram Saleem Alimgeer、Zahid Wadud、Imran Khan、Muhammad Usman、Abdul Baseer Qazi 和 Farrukh Aslam Khan。一种创新的优化策略：结合日前需求响应信号与能源消耗预测，利用人工神经网络实现智能电网的高效能源管理。*IEEE Access*，8:84415–84433，2020年。[94] Nasir Ayub、Nadeem Javaid、Sana Mujeeb、Maheen Zahid、Wazir Zada Khan 和 Muhammad Umar Khattak。使用支持向量机进行智能电网电力负荷预测。载于*International Conference on Advanced Information Networking and Applications*，第1–13页。Springer，2019年。[95] Sajjad Fattaheian-Dehkordi、Alireza Fereidunian、Hamid Gholami-Dehkordi 和 Hamid Lesani。使用支持向量回归（SVR）进行智能电网小时前需求预测。*International Transactions on Electrical Energy Systems*，24(12):1650–1663，2014年。[96] Mansoor Ali、Muhammad Adnan 和 Muhammad Tariq。智能电网短期负荷预测的最优控制策略。*International Journal of Electrical Power & Energy Systems*，113:792–806，2019年。[97] Ricardo J Bessa、Artur Trindade、C´atia SP Silva 和 Vladimiro Miranda。利用分布式信息进行智能电网概率性太阳能发电预测。*International Journal of Electrical Power & EnergySystems*，72:16–23，2015年。[98] Ranjeeta Bisoi、PK Dash 和 Pragyan P Das。利用优化多核极限学习机进行智能电网短期电价预测与分类。*Neural Computing and Applications*，32(5):1457–1480，2020年。[99] Sana Mujeeb、Nadeem Javaid、Mariam Akbar、Rabiya Khalid、Orooj Nazeer 和 Mahnoor Khan。智能电网价格与负荷预测的大数据分析。载于*InternationalConferenceon Broadbandand Wireless Computing, Communication and Applications*，第77–87页。Springer，2018年。[100] Eugene Yu Shchetinin。智能电网中基于聚类的能源消耗预测。载于*International Conference on Distributed Computer and Communication Networks*，第445–456页。Springer，2018年。[101] K Muralitharan、Rathinasamy Sakthivel 和 R Vishnuvarthan。用于智能电网能源需求预测的基于神经网络的优化方法。*Neurocomputing*，273:199–208，2018年。[102] Yandong Yang、Weijun Hong 和 Shufang Li。基于深度集成学习的智能电网概率性负荷预测。*Energy*，189 116324，2019 :。[103] Ghulam Hafeez、Imran Khan、Sadaqat Jan、Ibrar Ali Shah、Farrukh Aslam Khan 和 Abdelouahid Derhab。一种新颖的混合负荷预测框架，结合智能特征工程和优化算法，用于智能电网。*Applied Energy*，299:117178，2021年。[104] Liangzhi Li、Kaoru Ota 和 Mianxiong Dong。一切皆为图像：面向智能电网的基于卷积神经网络的短期电力负荷预测。载于*2017*年第*14*届普适系统与算法国际研讨会与电网 *& 2017*年第*11*届计算机科学与技术前沿国际会议 *& 2017*年第三届创意计算国际研讨会（*ISPAN-FCST-ISCC*），第344–351页。IEEE，2017年。[105] ET Lau、Q Yang、GA Taylor、AB Forbes、P Wright和VN Livina。智能电网中的碳排放优化。载于*2014*年第*49*届国际大学电力工程会议，第1–4页。IEEE，2014年。[106] Ahmed Yousuf Saber和Ganesh Kumar Venayagamoorthy。可再生能源与插电式车辆接入的智能电网不确定性下的资源调度。*IEEE*《系统期刊》，6(1):103–109，2011年。[107] Kalim Ullah、Ghulam Hafeez、Imran Khan、Sadaqat Jan和Nadeem Javaid。高比例可再生能源接入智能电网的多目标能源优化。*Applied Energy*，299 117104，2021年：。[108] Thillainathan Logenthiran、Dipti Srinivasan和Tan Zong Shun。采用启发式优化的智能电网需求侧管理。*IEEE*智能电网汇刊，3(3):1244–1252，2012年。[109] Habib Elkhorchani和Khaled Grayaa。面向智能电网碳减排、采用无线通信技术的新型家庭能源管理系统。《清洁生产杂志》，135:950–962，2016年。[110] P´eter G¨orbe、Attila Magyar和Katalin M Hangos。利用可再生能源为智能电网供电并采用电动汽车电池来降低功率损耗。《清洁生产杂志》，34 137，2012年 125：–。[111] Juan Miguel Gonzalez Lopez、Edris Pouresmaeil、Claudio A Canizares、Kankar Bhattacharya、Abolfazl Mosaddegh和Bharatkumar V Solanki。用于智能电网能源管理的智能住宅负荷模拟器。*IEEE*工业电子学汇刊，66(2):1443–1452，2018年。[112] Hossein Taherian、Mohammad Reza Aghaebrahimi、Luis Baringo和Saeid Reza Goldani。智能电网价格响应环境中电力零售商的最优动态定价。*International Journal of Electrical Power & Energy Systems*，130:107004，2021年。[113] A wais Manzoor、Nadeem Javaid、Ibrar Ullah、Wadood Abdul、Ahmad Almogren和Atif Alamri。面向智能家居、用于智能计量的需求侧管理智能混合启发式方案。《能源》，10(9):1258，2017年。[114] Sheraz Aslam、Adia Khalid和Nadeem Javaid。考虑微电网和日前能源预测的智能电网高效能源管理。*Electric Power Systems Research*，182 106232，2020年：。[115] Fabian Kennel、Daniel G¨orges和Steven Liu。基于分层模型预测控制的电动汽车智能电网能源管理。*IEEE*工业信息学汇刊，9(3):1528–1537，2012年。[116] Chengcheng Zhao、Jianping He、Peng Cheng和Jiming Chen。考虑输电损耗和有向通信的智能电网基于一致性的能源管理。*IEEE*智能电网汇刊，8(5):2049–2061，2017年。[117] Juntao Chen和Quanyan Zhu。智能电网两级分布式能源管理的斯塔克尔伯格博弈方法。*IEEE*智能电网汇刊，9(6):6554–6565，2018年。[118] Azim Keshtkar和Siamak Arzanpour。智能电网环境下住宅能源管理的自适应模糊逻辑系统。*Applied Energy*，186:68–81，2017年。[119] Xinyue Chang、Yinliang Xu、Wei Gu、Hongbin Sun、Mo-Yuen Chow和Zhongkai Yi。智能电网分布式混合随机/鲁棒能源管理的加速方法。*IEEE*工业信息学汇刊，17(8):5335–5347，2021年。[120] Lei Ding、Le Yi Wang、George Yin Yin、Wei Xing Zheng和Qing-Long Han。采用事件触发通信方案的智能电网分布式能源管理。*IEEE*控制系统技术汇刊，27(5):1950–1961，2019年。[121] Sudip Misra、Ayan Mondal、Shukla Banik、Manas Khatua、Samaresh Bera和Mohammad S Obaidat。智能电网住宅能源管理：一种基于马尔可夫决策过程的方法。载于*2013*年*IEEE*绿色计算与通信国际会议、*IEEE*物联网会议和*IEEE*网络、物理与社会计算会议，第1152–1157页。IEEE，2013年。[122] Wenchao Meng和Xiaoyu Wang。考虑风电和时间耦合约束的智能电网分布式能源管理。*IEEE*工业电子学汇刊，64(8):6052–6062，2017年。

[123] Shahwaiz Ahmed Hashmi、Chaudhry Fahad Ali和Saima Zafar。基于物联网和云计算的智能电网需求侧管理能源管理系统。International Journal of Energy Research，45(1):1007–1022，2021年。[124] Pengfei Duan、Hamid Soleimani、Arezoo Ghazanfari和Moslem Dehghani。考虑插电式混合动力汽车、基于云雾层架构的智能电网分布式能源管理。IEEE工业应用汇刊，2020年。[125] Ingo Mauser、Christian Hirsch、Sebastian Kochanneck和Hartmut Schmeck。用于能源管理和智能电网的有机架构。载于2015年IEEE国际自主计算会议，第101–108页。IEEE，2015年。[126] S Subha和S Nagalakshmi。用于智能电网应用的智能能源管理自适应神经模糊推理系统控制器设计。Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing，12(6):6117–6127，2021年。[127] Xin Wang、Yu Zhang、Tianyi Chen和Georgios B. Giannakis。智能电网供电的协调多点系统动态能源管理。IEEE通信领域精选期刊，34(5):1348–1359，2016年。[128] LA Hurtado、PH Nguyen和WL Kling。利用基于智能体的粒子群优化实现智能电网与智能建筑的互操作。Sustainable Energy, Grids and Networks，2:32–40，2015年。[129] Mohammad-Ali Rostami、Abdollah Kavousi-Fard和Taher Niknam。利用最优配电馈线重构，最小化含插电式混合动力电动汽车的智能电网期望成本。IEEE工业信息学汇刊，11(2):388–397，2015年。[130] Dan Li、Wei-Yu Chiu、Hongjian Sun和H. Vincent Poor。智能电网需求侧管理计划的多目标优化。IEEE工业信息学汇刊，14(4):1482–1490，2018年。[131] Ziming Zhu、Jie Tang、Sangarapillai Lambotharan、Woon Hau Chin和Zhong Fan。基于整数线性规划的智能电网家庭需求侧管理优化。载于2012年IEEE PES创新智能电网技术会议（ISGT），第1–5页，2012年。[132] Tie Qiu、Kaiyu Zheng、Houbing Song、Min Han和Burak Kantarci。具有自恢复功能的智能电网局部优化应急调度方案。IEEE工业信息学汇刊，13(6):3195–3205，2017年。[133] Luo Xu、Qinglai Guo、Tianyu Yang和Hongbin Sun。考虑网络物理相互依赖性的智能电网鲁棒路由优化。IEEE智能电网汇刊，10(5):5620–5629，2018年。[134] Yichi Zhang、Lingfeng Wang和Weiqing Sun。智能电网网络基础设施中的信任系统设计优化。IEEE智能电网汇刊，4(1):184–195，2013年。[135] Andr´e R. S. Vidal、Leonardo A. A. Jacobs和Lucas S. Batista。智能电网需求侧管理优化的进化方法。载于2014年IEEE智能电网计算智能应用研讨会（CIASG），第1–7页，2014年。[136] Lanchao Liu和Zhu Han。面向智能电网大数据优化的多块交替方向乘子法。载于2015年计算、网络与通信国际会议（ICNC），第556–561页，2015年。[137] 在考虑需求响应的火电机组组合中集成分布式发电，以实现智能电网储能优化。Renewable Energy，99:107–117，2016年。[138] Mohammadali Saffari、Mohammad Saeed Misaghian、Mohsen Kia、Alireza Heidari、Daming Zhang、Payman Dehghanian和Jamshid Aghaei。考虑多种套利机会的智能电网随机鲁棒优化。Electric Power Systems Research，174:105847，2019年。[139] Hamed Shakouri G.和Aliyeh Kazemi。智能电网住宅区需求侧管理的多目标成本—负荷优化。Sustainable Cities and Society，32:171–180，2017年。[140] Peng Yang、Phani Chavali、Elad Gilboa和Arye Nehorai。智能电网中采用可再生能源分布式发电机的并行负荷调度优化。IEEE智能电网汇刊，4(3):1431–1441，2013年。[141] Xi Fang、Dejun Yang和Guoliang Xue。智能电网信息管理向云端演进：云优化视角。IEEE智能电网汇刊，4(1):111–119，2013年。[142] Fanghong Guo、Changyun Wen、Jianfeng Mao和Yong-Duan Song。随机风电条件下智能电网的分布式经济调度。IEEE智能电网汇刊，7(3):1572–1583，2016年。[143] Philipp Braun、Lars Gr¨une、Christopher M. Kellett、Steven R. Weller和Karl Worthmann。用于智能电网预测控制的分布式优化算法。IEEE自动控制汇刊，61(12):3898–3911，2016年。[144] Jingfang Huang、Honggang Wang、Yi Qian 和 Chonggang Wang。基于优先级的流量调度与认知无线电通信基础设施智能电网的效用优化。IEEE智能电网汇刊，4(1):78–86，2013年。[145] Rui Tang 和 Shengwei Wang。智能电网中建筑需求响应的热能储存模型预测控制与热舒适度优化。《能源》，242:873–882，2019年。[146] Timothy M. Hansen、Robin Roche、Siddharth Suryanarayanan、Anthony A. Maciejewski 和 Howard Jay Siegel。智能电网中基于聚合商的资源分配启发式优化。IEEE智能电网汇刊，6(4):1785–1794，2015年。[147] Alireza Soroudi。智能电网中基于鲁棒优化的水火发电公司自主调度。《Energy》，61:262–271，2013年。[148]Zahoor Ali Khan、Ayesha Zafar、Sakeena Javaid、Sheraz Aslam、Muhammad Hassan Rahim 和 Nadeem Javaid。智能电网中基于混合元启发式优化的家庭能源管理系统。《Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing》，10(12):4837–4853，2019年。[149] Fady Y Melhem、Olivier Grunder、Zakaria Hammoudan 和 Nazih Moubayed。使用鲁棒优化算法在电力智能电网环境中进行能源管理。IEEE工业应用汇刊，54(3):2714–2726，2018年。[150] Italo Atzeni、Luis G. Ord´o˜nez、Gesualdo Scutari、Daniel P. Palomar 和 Javier R. Fonollosa。智能电网需求侧分布式能源发电与储能的非合作和合作优化。IEEE Transactions on Signal Processing，61(10):2454–2472，2013年。[151] C Puttamadappa 和 BD Parameshachari。使用萤火虫群优化技术对智能电网中的小型负荷进行需求侧管理。Microprocessors and Microsystems，71:102886，2019年。[152] Statistics Smart Grid。https://www.statista.com，2022年。 [在线；访问日期为4月15日-2022]。[153] Statistics Smart Grid。https://www.iea.org/reports/smart-grids，2022年。[在线；访问日期为4月15日-2022]。[154] Mostafa Rezaei Mozafar、Mohammad H. Moradi 和 M. Hadi Amini。基于改进遗传算法-粒子群优化算法，同时实现智能电网中可再生能源和电动汽车充电站的最优配置。Sustainable Cities and Society，32:627–637，2017年。[155] Elena Provata、Dionysia Kolokotsa、Sotiris Papantoniou、Maila Pietrini、Antonio Giovannelli 和 Gino Romiti。Leaf社区微电网优化算法的开发。Renewable Energy，74:782–795，2015年。[156] Urooj Asgher、Muhammad Babar Rasheed、Ameena Saad Al-Sumaiti、Atiq Ur-Rahman、Ihsan Ali、Amer Alzaidi 和 Abdullah Alamri。结合太阳能的智能电网启发式算法智能能源优化。《能源》，11(12):3494，2018年。[157] Stefano Leonori、Maurizio Paschero、Fabio Massimo Frattale Mascioli 和 Antonello Rizzi。基于遗传算法的微电网能源管理系统优化策略。Applied Soft Computing，86:105903，2020年。[158] Fanlin Meng、Xiao-Jun Zeng、Yan Zhang、Chris J. Dent 和 Dunwei Gong。面向智能电网中多类型客户零售商动态定价最优方案的集成优化 + 学习方法。Information Sciences，448-449:215–232，2018年。[159] Mabrouk Elmehdi 和 Maach Abdelilah。电动汽车车队最优充电调度的遗传算法。计算机协会，2019年。[160] Marwa Abuelnasr、Walid El-Khattam 和 Ibrahim Helal。使用遗传算法研究微电网拓扑结构对最优能源管理系统决策的影响。Ain Shams Engineering Journal，9(4):2807–2814，2018年。[161] Monica Alonso、Hortensia Amaris、Jean Gardy Germain 和 J uan Manuel Galan。通过启发式算法实现智能电网中电动汽车的最优充电调度。《能源》，7(4):2449–2475，2014年。[162] Rabiya Bibi、Nabila Ahmad 和 Shoab Ahmed Khan。智能电网运行成本函数优化。载于2017 IEEE第二届高级信息技术、电子与自动化控制会议（IAEAC），第2350–2355页。IEEE，2017年。[163] Razieh Rastgoo 和 Vahid Sattari-Naeini。使用遗传算法调整智能电网服务质量感知路由协议的参数。Applied Artificial Intelligence，30(1):52–76，2016年。[164] Parvathy Chittur Ramaswamy 和 Geert Deconinck。电压控制、电网重构和自适应保护在利用遗传算法实现其控制目标中的相关性

电网与遗传算法作为优化工具。载于*2011 International Conference on Networking, Sensing and Control*，第26–31页，2011年。[165] Taha Abdelhalim Nakabi、Keijo Haataja 和 Pekka Toivanen。智能电网需求侧管理与需求响应计划的计算智能。载于*Proceedings of the 8th International Con-ference on Bioinspired Optimization Methods and Their Applications, Paris,France*，第16–18页，2018年。[166] Safae Bourhnane、Mohamed Riduan Abid、Rachid Lghoul、Khalid Zine-Dine、Najib Elkamoun 和 Driss Benhaddou。智能建筑能源消耗预测与调度的机器学习。*SN Applied Sciences*，2(2):1–10，2020年。[167] E. F. Areed 和 M. A. Abido。智能电网中用于电压调节的电气弹簧设计与动态分析。载于*2015 18th InternationalConferenceon IntelligentSystem Application to Power Systems (ISAP)*，第1–6页，2015年。[168] Peiyao Wang、Liang Chen、Aidong Xu、Juan Guo、Yixin Jiang、Peng Zhang、Lingzhi Fei、Yunan Zhang、Runhui Zhao、Tengyue Zhang 等。基于人工智能的智能能源系统经济优化示例。第249–253页。IEEE，2021年。[169] Lei Yan、Xin Ai、Yao Wang 和 Huiying Zhang。考虑分时电价时间序列的电动汽车对电网的影响。第1–5页。IEEE，2014年。[170] Robin Roche、Sudarshan Natarajan、Ayan Bhattacharyya 和 Siddharth Suryanarayanan。人工智能工具与电力系统分析软件协同仿真的框架。第350–354页。IEEE，2012年。[171] Vaiju Kalkhambkar、Rajesh Kumar 和 Rohit Bhakar。电池储能与混合可再生分布式发电的联合最优配置。第1–6页。IEEE，2016年。[172] Astitva Kumar、Muhannad Alaraj、Mohammad Rizwan 和 Uma Nangia。集成可再生能源系统的智能电网新型人工智能能源管理系统。*IEEE Access*，9:162530–162542，2021年。[173] Linfei Yin 和 Zhixiang Sun。面向多区域互联电力系统分布式多目标经济调度的分布式多目标灰狼优化器。*Applied Soft Computing*，117 108345，2022年：。[174] Jueru Huang、Dmitry D Koroteev 和 Marina Rynkovskaya。利用人工智能进行建筑能源管理与预测：先进技术。*Computers & ElectricalEngineering*，99 107790，2022年：。[175] Belkacem Mahdad 和 K Srairi。基于灰狼-模式搜索算法的智能电网灵活最优策略停电风险预防。*EnergyConversionandManagement*，98:411–429，2015年。[176] Sharif Naser Makhadmeh、Ahamad Tajudin Khader、Mohammed Azmi Al-Betar、Syibrah Naim、Ammar Kamal Abasi 和 Zaid Abdi Alka-reem Alyasseri。用于智能家居功率调度问题的新型结合最小冲突算法的混合灰狼优化器。*Swarm and Evolutionary Computation*，60:100793，2021年。[177] Sharif Naser Makhadmeh、Ahamad Tajudin Khader、Mohammed Azmi Al-Betar 和 Syibrah Naim。使用灰狼优化器和智能电池对智能家居电器进行最优功率调度。载于*20188th IEEE international conference on control system, computing and engineering (ICCSCE)*，第76–81页。IEEE，2018年。[178] Hamed Moazami Goodarzi 和 Mohammad Hosein Kazemi。基于分布式发电下垂参数优化、采用改进灰狼优化器和可再生能源的最优自治微电网集群。*Engineering Optimization*，50(5):819–839，2018年。[179] Eman Mostafa、Mohamed Abdel-Nasser 和 Karar Mahmoud。带变异算子的元启发式优化方法在联合经济与排放调度中的性能评估。载于*2017 Nineteenth International Middle East PowerSystems Conference (MEPCON)*，第1004–1009页。IEEE，2017年。[180] Tesfahun Molla、Baseem Khan、Bezabih Moges、Hassan Haes Alhelou、Reza Zamani 和 Pierluigi Siano。家用电器与经济高效能源管理系统的集成优化。*CSEE Journal of Power and Energy Systems*，5(2):249–258，2019年。[181] Farhad Samadi Gazijahani、Hassan Hosseinzadeh、Ata Ajoul Abadi 和 Javad Salehi。考虑需求和发电不确定性的微电网日前功率最优调度。载于*2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*，第943–948页。IEEE，2017年。[182] M Azizuddin、A Khalil、Sharina Yunus、Rafidah Petra、Saifulbahri Jaafar、AS Peng 和 Sheroz Khan。最优控制器设计

使用灰狼优化算法的并联直流-直流变换器。在2019年IEEE第六届工程技术与应用科学国际会议（ICETAS）上，第1–6页。IEEE，2019年。[183] Aqdas Naz、Nadeem Javaid、Muhammad Babar Rasheed、Abdul Haseeb、Musaed Alhussein和Khursheed Aurangzeb。微电网中结合储能容量优化与光伏电池发电功率预测的博弈论能源管理。《可持续性》，11(10):2763，2019年。[184] Eman Mostafa、Mohamed Abdel-Nasser和Karar Mahmoud。将变异算子应用于灰狼优化器以求解排放-经济调度问题。在2018年计算机工程创新趋势国际会议（ITCE）上，第278–282页。IEEE，2018年。[185] Yuhao Cao、Tengpeng Chen、Xinlin Qing、Jingrui Zhang和Lu Sun。使用改进灰狼优化器，对具有不同电池充放电优先级的微电网进行能源管理。在2019年IEEE PES亚太电力与能源工程会议（APPEEC）上，第1–5页。IEEE，2019年。[186] Aqdas Naz、Muhammad Umar Javed、Nadeem Javaid、Tanzila Saba、Musaed Alhussein和Khursheed Aurangzeb。智能电网中使用增强型极限学习机优化进行短期电力负荷和价格预测。《能源》，12(5):866，2019年。[187] Pedro Faria、Zita Vale、Joao Soares和Judite Ferreira。使用粒子群优化进行电力系统需求响应管理。《IEEE智能系统》，28(4):43–51，2011年。[188] Jo˜ao Soares、Hugo Morais、Tiago Sousa、Zita Vale和Pedro Faria。包含电动汽车需求响应的日前资源调度。《IEEE智能电网汇刊》，4(1):596–605，2013年。[189] Jo˜ao Soares、Mohammad Ali Fotouhi Ghazvini、Marco Silva和Zita Vale。面向基于种群的元启发式算法的多维信号方法：求解智能电网中的大规模调度问题。《群体与进化计算》，29:13–32，2016年。[190] Kent CB Steer、Andrew Wirth和Saman K Halgamuge。用于大型智能电网在线运行的决策树集成。《能源转换与管理》，59:9–18，2012年。[191] Jo˜ao Soares、Tiago Sousa、Hugo Morais、Zita Vale、Bruno Canizes和Ant´onio Silva。考虑车辆到电网的应用特定改进粒子群优化，用于能源资源调度。《Applied Soft Computing》，13(11):4264–4280，2013年。[192] Tiago Sousa、Fernando Lezama、Joao Soares、Sergio Ramos和Zita Vale。支持智能电网聚合商请求的灵活型家庭能源管理系统。在2018年IEEE计算智能研讨会系列（SSCI）上，第1830–1836页。IEEE，2018年。[193] Santhosh Kasi和R Neela。使用粒子群优化器和鹰策略实现微电网运行成本最小化——使用PSO和ES实现微电网运行成本最小化。在2020年第四届I-SMAC国际会议（社会、移动、分析与云中的物联网）（I-SMAC）上，第1207–1212页。IEEE，2020年。[194] Cemal Keles、Baris Baykant Alagoz和Asim Kaygusuz。通过粒子群优化实现可再生能源微电网的多源能源混合。在2017年国际人工智能与数据处理研讨会（IDAP）上，第1–5页。IEEE，2017年。[195] Djamila Mechta、Saad Harous和Sara Hebal。基于PSO的智能电网能效路径感知路由协议。在2020年IEEE电气信息技术国际会议（EIT）上，第093–097页。IEEE，2020年。[196] Ricardo Faia、Pedro Faria、Zita Vale和Jo˜ao Spinola。住宅中考虑最优电池储能计划的粒子群算法需求响应优化。《能源》，12(9):1645，2019年。[197] ZA Vale、H Morais、Pedro Faria、J Soares和Tiago Sousa。智能电网中运行的虚拟电力参与者基于节点边际电价的报价形成。在2011年IEEE电力与能源学会年会上，第1–8页。IEEE，2011年。[198] Pedro Faria、Jo˜ao Soares、Zita Vale、Hugo Morais和Tiago Sousa。将改进粒子群优化应用于综合需求响应与分布式发电资源调度。《IEEE智能电网汇刊》，4(1):606–616，2013年。[199] Payam Farhadi和Seyyed Masoud Moghaddas Tafreshi。使用新开发模型参与日前备用电力市场，实现太阳能微电网的智能运行。在2019年第七届伊斯坦布尔国际智能电网与城市大会暨展览会（ICSG）上，第46–50页。IEEE，2019年。

[200] Pedro Faria、Zita A Vale、Jo˜ao Soares和Judite Ferreira。将粒子群优化应用于综合需求响应资源调度。在*2011*年*IEEE*智能电网计算智能应用研讨会（*CIASG*）上，第1–8页。IEEE，2011年。[201]Pramod Uthpala Herath、Vito Fusco、Mar´ıa Navarro C´aceres、Ganesh Kumar Venayagamoorthy、Stefano Squartini、Francesco Piazza和Juan Manuel Corchado。基于计算智能的微电网需求响应管理。*IEEE*工业应用汇刊，55(1):732–740，2018年。[202] Ahmed Saif、V Ravikumar Pandi、HH Zeineldin和Scott Kennedy。通过基于仿真的优化实现分布式能源资源的最优配置。*Electric Power Systems Research*，104:1–8，2013年。[203] Rania Hassan、Babak Cohanim、Olivier De Weck和Gerhard Venter。粒子群优化与遗传算法的比较。在第*46*届*AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC*结构、结构动力学与材料会议上，第1897页，2005年。