

# 机组调度——文献综述

纳拉亚纳·普拉萨德·帕迪

**摘要**——随着电力行业技术的快速更迭, 针对新兴技术的电力参考资料不断涌现。因此亟需追踪现代机组调度 (UC) 问题领域内的国际经验与动态。本文基于150余篇已发表文献, 对过去35年间机组调度问题领域的文献综述、数学建模及研究发展背景进行系统梳理。所收集文献已划分为多个章节, 使新研究者在受监管与非受监管电力行业背景下开展新一代机组调度问题研究时能够顺利推进。

**索引词**——蚁群系统、人工神经网络、分支定界法、电力市场自由化、动态规划、枚举法、进化计算、专家系统、模糊逻辑、遗传算法、混合模型、整数规划、内点法、拉格朗日松弛法、线性规划、优先级列表、模拟退火法、禁忌搜索法、机组调度。

## I. 引言

许多公用事业公司的每日负荷模式显示出高峰时段与非高峰时段之间的极端差异, 因为周六的用电量低于工作日, 周日的用电量低于周六, 而午夜至清晨时段的用电量又低于白天时段[5], [13], [64], [66], [104]。若全天维持足以应对峰值需求的发电量在线运行, 部分机组在非高峰时段可能接近最低发电限值运行。系统调度者面临的难题在于确定哪些机组应离线及离线时长。在多数互联电力系统中, 电力需求主要由火力发电满足。针对每日逐小时变化的电力需求, 可采用多种运行策略。基于经济性准则, 采用最优或次优运行策略更为可取。换言之, 电力系统运行的重要准则是通过优化各类发电机组组合, 以最低燃料成本满足电力需求。此外, 为安全经济地向用户提供高质量电力, 热机组调度 (UC) 被视为最佳可行方案之一。因此, 热电力系统的最优调度——即在设备与运行约束条件下确定发电机组运行计划的问题——被公认为能为电力企业带来显著节约。故UC问题的基本目标是在满足所有约束的前提下, 使系统总运行成本最小化。

稿件于2003年9月2日收到。

作者现任职于印度理工学院罗尔基分校电气工程系 (印度罗尔基247667)。

数字对象标识符 10.1109/TPWRS.2003.821611

约束条件, 以满足给定安全级别[61], [77], [139]。

本文综述了用于解决UC问题的不同方法, 并指明了新型解决方案随时间演进的发展方向。所引文献摘自以下期刊与会议论文集:

- IEEE电力系统汇刊;
- IEEE电力系统汇刊 电力设备与系统汇刊 APPARATUS 系统;
- IEE发电、输电与配电会议论文集;
- 国际电力与能源系统期刊;
- 国际电力系统研究期刊;
- 国际电力与能源系统期刊;
- 国际电力元件与系统期刊 (原名《电机与电力系统》);
- IEEE电力系统评论;
- IEEE电力工程学会会议论文集 夏季/冬季会议、PICA等;

## II. 基本背景与概念

为解决最佳无负荷运行 (UC) 问题, 已开发出多种方法。这些方法涵盖从高度复杂且理论繁琐的技术手段到简单的经验法则。运行调度问题的范围因各电力公司而异, 主要取决于其机组组合及特定运行约束[11]、[35]、[47]、[65], [72], [75]。

运行调度对经济的影响至关重要。由于燃料成本是主要成本构成部分, 即使仅降低0.5%的燃料成本, 大型公用事业公司每年也能节省数百万美元[15], [110]。

电力系统运行中一项关键任务是: 在长达一年的规划周期内, 综合技术与经济约束条件实现最优无煤运行 (UC)。精确求解长期无故障运行[73]、[118]、[138]因计算时间过长而不可行; 反之, 将短期无故障运行外推至长期时段亦不妥当, 因其忽略了维护时间、价格上涨等诸多约束条件。

能源管理系统必须执行更复杂且及时的系统控制功能, 才能可靠高效地运行大型电力系统。对于由联络线互连多个发电区域的电力池[111]而言, 其目标是实现最经济的

发电策略，在满足本地需求的同时不违反联络线容量约束[16]、[20]、[76]。尽管单一区域的热电与水电联合调度已获广泛研究，但多区域发电调度方案尚未得到充分关注。现有涉及多区域联合调度的文献表明，为维持联络线约束，调度方案应与可行的经济调度协同考虑。

过去，需求预测会告知电力系统运营商需要发电的总量[117]。但在部分或完全解除管制的环境下，未来双边现货与远期合约将使部分总需求得以事先确定[23]。剩余需求仍将采用传统预测方式。然而发电公司（GENCOs）在剩余需求中的份额可能难以预测，因其定价需与其他供应商进行比较。发电公司的定价取决于其对剩余需求份额的预测——这将决定其启用多少发电机组。统一调度计划直接影响平均成本，间接影响电价，因此成为任何成功投标策略的关键输入要素。人们可能倾向于认为利润最大化本质上等同于成本最小化，但事实并非如此。必须注意的是，由于发电公司不再承担满足需求的义务，其发电量可能低于需求量。这种灵活性使得在自由化环境下的统一调度问题更为复杂。最终，利润不仅取决于成本，更取决于收入。若收入增幅超过成本增幅，利润便会增长。因此在下一代统一调度问题中，研究人员仍需发挥关键作用。

若投标函数本质上是非凸或不可微的——这种情况在受监管与非受监管电力行业中均常见——则上述问题将变得复杂。此外，若在供应商和买方两侧同时引入竞争机制（包括排放约束），复杂性将进一步加剧。实践表明，融合经典与非经典方法的混合模型能够有效处理发达国家普遍存在的现代复杂用户中心问题。

电力公司必须利用现有的标准软件产品，结合能源管理系统，增强、发展、升级或添加新应用，例如为现代自由化电力行业提供的统一协调解决方案[41]、[44]、[85]。

### III. 电力行业自由化背景下的无源网络

自1980年代中期以来，全球电力供应行业在发电、输电和配电方式方面经历了快速而重大的变革。为提高电力生产与输送效率，多个传统上由联邦及州政府管控的国家相继推行电力行业私有化、重组乃至最终的放松管制。英国、美国、加拿大、澳大利亚、新西兰、智利、阿根廷、秘鲁、哥伦比亚及斯堪的纳维亚等众多国家

等国已率先推行电力行业自由化。尽管过程中存在诸多挑战，但终端用户正享受到自由化带来的切实利益。因此，发达国家与发展中国家都应顺应现代电力产业需求，及时调整或更新传统运营模式。

在任何重组或解除管制后的电力行业中，电力池均基于统一成本模型实施电力调度。供应商提交报价以满足预测的每日无弹性需求[12]。每份报价包含成本函数及定义发电机组运行边界的参数集。电力池解决统一成本问题后，即可确定各时段的系统边际价格。系统边际价格实质上是排程发电机组中的最高平均成本。采用统一成本模型进行电力池拍卖时，已引发若干排程与定价争议[99]、[127]。研究表明，当成本最小化模型被定义为最高平均成本时，其并不必然导致更低价格。可能存在导致价格更低的次优成本解，因此成本最小化UC模型在电力池拍卖中的适用性受到质疑。*Chattopadhyay*等[26]提出了一种能执行发电调度、跨公用事业传输调度及非公用事业发电采购规划等任务的模型。随着电力行业重组，有必要更新UC算法。在文献[23]中，提出了一种基于价格/利润的最优协调问题，该模型考虑了柔性需求约束，并将固定成本和过渡成本分配至调度时段。2001年8月，*M. Madrigal*等人[82]研究了统一调度电力池拍卖中竞争性市场均衡的存在性、确定性及其影响，以避免利益冲突与收益短缺问题。2001年，*Valenzuela*等[60]与*Larsen*等[129]针对电力生产商在电力市场自由化环境下的统一调度问题，提出了新的建模方案。

### IV. 联合调度问题建模

通用机组调度问题可表述为：

Minimize Operational Cost (OC)

$$OC = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T FC_{it}(P_{it}) + MC_{it}(P_{it}) + ST_{it} + SD_{it} \text{ \$/hr} \quad (1.1)$$

其中 $FC_{it}(P_{it})$ （燃料成本）为输入/输出（I/O）曲线，通常采用二次曲线建模。

$$FC_{it}(P_{it}) = a_i * P_{it}^2 + b_i * P_{it} + c_i \text{ \$/hr} \quad (1.2)$$

$a_i$ 、 $b_i$ 和 $c_i$ 分别为成本系数。

维护成本( $MC_{it}(P_{it})$ )由下列公式描述：

$$MC_{it}(P_{it}) = BM_{it} + IM_{it} * P_{it} \text{ \$/hr} \quad (1.3)$$

其中 $BM_{it}$ 为基础维护成本， $IM_{it}$ 为增量维护成本。

启动成本( $ST_{it}$ )由下列公式描述：

$$ST_{it} = TS_{it} + (1 - e^{(D_{it}/AS_{it})})BS_{it} + MS_{it} \text{ \$/hr} \quad (1.4)$$

TS<sub>it</sub> 涡轮启动成本; 锅炉启动成本;  
BS<sub>it</sub> 本; 启动维护成本; 停机小  
MS<sub>it</sub> 时数;  
D<sub>it</sub> 时数;  
AS<sub>it</sub> 锅炉冷却系数。

同样地, 停机成本(SD<sub>it</sub>)由下列公式描述:

$$SD_{it} = KP_{it} \quad \$/hr \quad (1.5)$$

其中K为增量关机成本。

**受以下约束条件限制:**

最小运行时间

机组必须运行一定小时数后才能停机;

最小停机时间

设备必须保持关闭状态达到一定小时数后才能重新上线;

发电机的最大与最小输出限制

$$P_{it \min} \leq P_{it} \leq P_{it \max}.$$

爬坡率

$$\nabla P_{it} \leq \nabla P_{it \max}.$$

功率平衡

$$\sum_{i=1}^N (U_{it} \cdot P_{it}) = D_t^f + \text{损失}$$

必须运行机组

这些机组包括因运行可靠性及/或经济性考量必须保持在线的预定机组;

必须停运机组

因强制停运及检修无法投入运行的机组;

旋转备用

为将负荷中断降至最低, 电力系统运行需配置旋转备用。此需求部分源于设备不可避免的停机。旋转备用要求可通过额外兆瓦容量或特定可靠性指标进行规定;

人员配置限制

部分电站因操作人员规模限制, 禁止同一电站内两个及以上机组同时启停。此类限制需通过机组投运所需时间与停运所需时间进行量化规定。

在解除管制环境下重新定义无约束问题

[23] 涉及将需求约束从等式改为小于等于, 并将目标函数从成本最小化改为利润(收入-运营成本)最大化。现在, 在放松管制环境下的通用统一调度问题可表述为:

$$\begin{aligned} & \text{Maximize Profit (P)} \\ & P = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (P_{it} \cdot f_{pt}) \cdot U_{it} - OC. \end{aligned} \quad (1.6)$$

**受以下约束条件限制:**

新增功率平衡

$$\sum_{i=1}^N (U_{it} \cdot P_{it}) \leq D_t^f \quad (1.7)$$

其中

N 机组数量;

T 时间段数量; 时间段t的预测价格

$f_{pt}$  ; 机组i的启停状态;

$U_{it}$  机组i在时间段t的发电量; 时间段t的预测需求量。

$P_{it}$

$D_t^f$

备用容量与输电损耗按合同规定, 其余约束条件与通用无约束问题相同。类似地, 在受监管与非受监管环境下, 可通过在(1.1)与(1.2)式并列引入以下系统约束扩展网络约束无约束问题:

(1.6)式

• 电力网络的功率流方程

$$g(V, \phi) = 0$$

其中

$$g(V, \phi) = \begin{cases} P_i(V, \phi) - P_i^{net} \\ Q_i(V, \phi) - Q_i^{net} \\ P_m(V, \phi) - P_m^{net} \end{cases} \begin{cases} \leftarrow \text{For each PQ bus } i \\ \leftarrow \text{For each PV bus } i \\ \leftarrow m, \text{ not including the ref. bus.} \end{cases}$$

其中

$PQ_i$  分别表示PQ节点i的计算有功功率与无功功率;

$P_i^{net} Q_i^{net}$  分别为PQ节点i的设定有功功率与无功功率;

$P_m P_m^{net}$  分别为PV节点m计算的和规定的有功功率;

$V \phi$  为不同节点处的电压幅值与相位角。

• 各光伏母线 $Qg_i$ 的无功功率生成不平等约束条件

$$Qg_i^{\min} \leq Qg_i \leq Qg_i^{\max}$$

其中 $Qg_i^{\min}$ 和 $Qg_i^{\max}$ 分别表示i节点有功功率的最小值与最大值。

• 每个PQ母线的电压幅值V的不等式约束

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}$$

其中 $V_i^{\min}$ 和 $V_i^{\max}$ 分别表示i节点处的最小电压值与最大电压值。

• 所有节点电压的相位角 $\phi_i$ 的不等式约束 i

$$\phi_i^{\min} \leq \phi_i \leq \phi_i^{\max}$$

其中 $\phi_i^{\min}$ 和 $\phi_i^{\max}$ 分别表示i节点允许的最小与最大电压相位角。

• 输电线路的MVA流量限制

$$MVAf_{ij} \leq MVAf_{ij}^{\max}$$

其中 $MVA_{ij}^{\max}$ 为连接 $i$ 与 $j$ 两端点的输电线路额定最大值。

V. 方法论与分析

化方法的性能，其中三种基于动态规划方法。

A. 穷举枚举法

UC问题早先通过枚举所有可能的发电机组组合来解决，随后选取运行成本最低的组合作为最优解。在[104]中，*Kerr*等人，以及在[66]中，*Hara*等人，成功运用穷举枚举法解决了包含佛罗里达电力公司的UC问题。尽管该方法不适用于大型电力公司，但能够提供精确的解决方案。

B. 优先排序法

优先级排序法首先依据最低运行成本特性对发电机组进行排序，随后采用预设顺序进行联合调度，确保满足系统负荷需求。*Burns*等人[105]与*Lee*[38]运用优先级排序处理了UC问题。*Shoults*等人[109]提出了一种基于优先级排序且包含进出口约束的简洁高效算法。*Lee*[36]及*Lee*等人[34]则运用经典指标的优先级排序解决了单区域与多区域UC问题。

C. 动态规划

用电力系统术语来说，动态规划的本质在于：当N台发电机组承担x兆瓦（MW）负荷时，其总运行成本需最小化。此时第N台机组承担的负荷y MW必须满足：剩余 $(x - y)$  MW负荷由其余机组承担

$$F_N(x) = \min_{y} \{ g_N(y) + f_{N-1}(x - y) \}$$

其中 $f_{N-1}(x - y)$ 为N-1台机组承担 $(x - y)$ 兆瓦负荷时的最小运行成本。数学表达式如下：

$f_{N-1}(x - y)$  其中  
 $F_N(x)$  在N台发电机组上运行x兆瓦负荷的最小运行成本；  
 $g_N(y)$  机组N承载y兆瓦负荷的成本；  
 $f_{N-1}(x - y)$  其余N-1台机组承载 $(x - y)$ 兆瓦负荷时的最小成本。  
 $(x - y)$  兆瓦负荷在其余N-1台机组上的最小运行成本。

动态规划是应用于统一调度问题最早的优化方法，在全球范围内被广泛采用。其优势在于能够处理不同规模的问题，并可轻松调整以适应特定公用事业的特性[107]，[136]。由于这些约束主要影响经济调度和求解方法[33]，因此添加影响小时级运行的约束相对容易。而纳入影响单台机组时序运行的约束则更为困难[57]。动态规划的缺点在于：需限制每小时考虑的机组投入量，且对最小运行时间/停机时间约束及时间依赖型启动成本的处理存在次优性[22]。

在[98]中，*Lowery*探讨了动态规划在统一调度方案中的实际应用性。1971年，*Happ*[46]指出个人计算机解决方案相较于人工承诺方案的优势，并宣称其节省的燃料成本超过总成本的1%，对于100台机器的系统而言相当于7000美元。*Pang*等人[14]比较了四种联合优

库西克等人[40]解决了全资与共同所有发电机组的联合调度问题。

霍布斯等人[135]在能源管理系统中开发并实现了现实化的联合调度模型。

统一调度方案的核心目标在于：不仅满足传统要求——即在满足旋转备用和稳态输电容量限制的前提下实现最低燃料成本[19]，更通过实施动态安全约束[141]提供优异的动态性能。李等[21]提出基于弃用程序的新型统一调度方法，用于解决电力资源调度问题。该方法从研究期内所有可用机组的初始调度方案出发，通过动态规划逐台实现机组解脱。Sen 等人[127]运用截断动态规划解决多区域UC问题，并将其应用于具有不同运行特性的印度双区域电力系统。最后，Siu 等人[131]为不列颠哥伦比亚水电局开发了实用的水电动态UC与负荷模型。

#### D. 整数与线性规划

Dillon 等人[130]基于分支定界法的扩展与改进，提出了一种适用于实际规模调度问题的整数规划方法。该方法将统一调度问题分解为非线性经济调度问题与纯整数非线性统一调度问题（基于Benders方法）。而混合整数规划方法则通过剔除不可行子集来缩小解搜索空间，从而求解统一调度问题。线性规划UC问题可通过两种方式求解：一是借助丹齐格-沃尔夫分解原理将整体问题分解为子问题，再分别采用线性规划求解；二是直接运用改进单纯形法[44]进行求解。

#### E. 分支定界法

Lauer 等[42]与Cohen 等[10]提出基于分支定界法的新型UC问题求解方案，该方案兼顾所有时间依赖约束且无需单元优先级排序。在[74]中，Huang 等人结合约束逻辑规划与分支定界技术，为UC问题提供了高效灵活的解决方案。

分支定界法由以下步骤的反复应用构成：首先，将已知最优解所在的解空间部分（即待考虑的决策变量集合）划分为若干子集。其次，若某子集所有元素均违反最小化问题的约束条件，则该子集被排除出后续考虑范围（即被“探测”）。第三，计算目标函数最小值的上界。最后，当决策变量被约束在每个仍在考虑的子集中时，计算目标函数值的下界。若某子集的下界超过最小化问题的上界，则该子集被判定为已穷尽，因为最优决策变量不可能位于该子集中。当仅剩一个决策变量子集且该子集的上界与下界相等时，即达到收敛状态。

## F. 拉格朗日松弛法

基于拉格朗日松弛法, 无约束优化问题可表述为: 1) 成本函数由多个单项和组成, 每项仅涉及单个机组; 2) 约束集包含涉及单个机组的约束; 3) 耦合约束集 (发电与备用约束) 涵盖研究期内每小时所有机组。形式化表达如下[30], [86], [126], [128]:

$$\text{最小化} \quad \sum_t \sum_i OC(G_i(t), U_i(t)).$$

在机组约束下  $L_i(G_i, U_i) \leq 0$ .  
 $= (G_i(1), \dots, G_i(T))$  且  $U_i =$   
 对于所有机组  $i$ , 满足  $G_i$   
 $(U_i(1), \dots, U_i(T))$ ; 以及耦合发电与备用约束

$$\sum_i R_{i,n}(G_i(t), U_i(t)) \geq \text{Re } s - \text{Re } q(t).$$

对于所有时刻  $t$  和需求  $n$ , 埃弗雷特证明可通过拉格朗日乘子法将耦合约束附加到成本函数上, 从而获得该问题的近似解。由此得到的“松弛”问题是在单位约束下最小化所谓的拉格朗日量, 其中

$$D(G_i, U_i) = \sum_t \sum_i \left[ OC(G_i(t), U_i(t)) - \sum_i \lambda_n(t) R_{i,n}(G_i(t), U_i(t)) \right]$$

其中  $\lambda_n(t)$  是与第  $n$  个时间  $t$  要求相关的乘子。描述拉格朗日松弛法需解答以下问题: 1) 如何确定乘子  $\lambda_n(t)$  使松弛问题的解接近最优解; 2) 解与最优解的接近程度; 3) 如何求解松弛问题? 埃弗雷特理论与对偶理论共同为上述问题及其解决方案提供了深刻见解。

拉格朗日松弛法也被部分公用事业公司常规采用[9]、[106]、[112]。相较于动态规划, 该方法在生产用电优化方案中的应用历史较短。对于拥有大量发电机组的电力公司, 拉格朗日松弛法具有显著优势——随着机组数量增加, 次优程度趋近于零。该方法还具备易于调整以适应特定电力公司特征的优点, 添加机组约束条件相对简单。其主要缺点在于固有的次优性。

在[7]中, *Merlin* 等人提出基于拉格朗日松弛法的全新UC方法, 并经法国电力公司验证。*Aoki* 等人[62]、[63]将该方法应用于包含常规热机组、燃料约束热机组及抽水蓄能机组三类机组的大规模最优UC问题。*左* 等人[32]提出三阶段拉格朗日松弛算法: 第一阶段采用标准次梯度技术最大化联合调度拉格朗日对偶函数; 第二阶段求解储备可行对偶解; 第三阶段进行经济调度。*王* 等人[17]提出了一种严谨的数学方法, 用于处理无源控制中的爬坡速率限制及转子疲劳效应

。*Ma* 等[52]将最优功率流纳入无约束优化框架。通过Benders分解法, 该框架被分解为主问题与子问题。主问题通过增广拉格朗日松弛法解决除输电安全与电压约束外的常规调度问题。*Takriti*[120]与*Cheng*[24]亦提出了拉格朗日松弛法的复杂度优化方案。

## G. 内点优化法

内点法不仅成功解决了大规模线性与非线性规划问题, 还用于处理组合优化与非可微问题。内点法现已应用于电力系统的调度问题求解。*Madrigal* 等人[81]基于其观察到的内点法两大优势——更优的收敛特性及无需参数调优——将其应用于UC问题的求解。

## H. 禁忌搜索

禁忌搜索是一种强大的优化方法, 已成功应用于多种组合优化问题。其通过灵活的记忆系统避免陷入局部最优解的陷阱[1]。*Mori* 等人[48]、[149]提出将优先级列表嵌入禁忌搜索的发电机组调度算法。*Rajan* 等人[148]采用基于神经网络的禁忌搜索方法解决发电机组调度问题。在[150]中, *Lin* 等人开发了改进型禁忌搜索算法用于经济调度问题。*Mantawy* 等人[1]、[3]利用禁忌搜索提出机组调度方案, 并通过新型禁忌搜索算法高效解决了长期水电调度问题[151]。

## I. 模拟退火法

模拟退火法由柯克帕特里克、盖拉和韦基于1982年独立提出, 并由切尼于1985年进一步完善。退火在物理学中指将固体加热至高温后, 通过逐步降低环境温度实现缓慢冷却的过程[68], [133]。通过将退火过程与优化问题类比, 可遵循系统从平衡态向另一平衡态过渡的相同流程, 解决大量组合优化问题, 从而使系统达到最低能量状态。在求解UC问题时, 需确定两类变量: 即单元状态 (二进制) 变量  $U$  和  $V$ , 以及单元输出功率 (连续) 变量  $P$ 。该问题可分解为两个子问题:  $U$  和  $V$  的组合优化问题, 以及  $P$  的非线性优化问题。因此模拟退火法适用于求解UC问题。*Mantawy* 等人[2]提出基于模拟退火的UC求解算法, 并指出该算法虽存在计算耗时长的缺点, 但具有初始解无关性与数学复杂度低等显著优势。

## J. 专家系统

*经验即知识，理解知识即智慧。（纳拉亚纳·普拉萨德·帕迪）*

专家系统是一种智能计算机程序，它运用知识与推理程序解决那些需要人类专业知识才能攻克的难题[29]。通常，其知识体系源自领域内的人类专家，并试图模拟他们的方法论与表现[67]，[89]。如同技艺精湛的人类，其理论与实践知识皆通过领域经验得以完善。但与人类不同的是，现有程序无法从自身经验中学习；其知识必须从人类处提取，并以形式化语言编码[37]。

基于专家系统的短期调度方法旨在实时处理大规模发电计划[138]、[145]，该方法融合了数据库管理与专家系统设计的最新进展，并广泛采用人机界面进行研究。该系统的实时处理能力面临数学规划方法（整数与线性规划、拉格朗日松弛法等）的挑战[113]，[137]。

Mokhtari 等人[114]开发了一种基于专家系统的顾问工具，用于协助电力系统操作员调度发电机组运行。欧阳等人[146]提出了一种由承诺调度数据库、动态负荷模式匹配过程和接口优化过程组成的UC专家系统。Tong 等人[119]提出了一种基于优先级列表启发式算法的UC方案，通过接口规则形式为给定负荷模式寻找次优调度方案。Salam 等人[83]于1991年开发的专家系统，作为截断动态规划型UC程序的前处理器与后处理器，用于获取可操作的可行解。

## K. 模糊系统

*当复杂性增加时，精确的陈述会失去意义，而有意义的陈述则会丧失精确性。（洛夫蒂·A·扎德）*

扎德于1965年提出模糊集概念，作为描述语言学中模糊性的数学手段。该理论可视为经典集合论的推广。自扎德发表模糊集先驱论文后的十年间，模糊逻辑在美国、欧洲和日本取得了诸多理论进展。然而自1970年代中期至今，日本研究者在推动理论实践应用方面成效卓著，成为该技术商业化的主要推动力量。

统一调度（UC）是一种复杂决策过程[84]，其通过在不同时段调度适宜机组运行，并规划已投入机组的发电量以满足预测需求，从而实现运行成本最小化。由于负荷需求的不确定性及发电机组的停运风险[65]，这引发了关键问题：当负荷需求及其他变量存在不确定性时[79]、[88]、[93]、[94]，如何有效解决统一调度问题？重——

研究者观察到，在不确定性条件下，随机模型比确定性模型表现更优，但其本身也存在局限性[121]。

Tong 等[119]通过考虑热机组停运与需求不确定性构建了理性模型。Zhai 等[28]提出分析负荷不确定性对无停机风险影响的方法，该风险指无法调动足够承诺容量补偿机组故障和/或突发负荷波动的概率。Saneifard 等人[122]展示了模糊逻辑在无备容量问题中的应用。该方法无需精确数学公式即可定性描述系统行为、系统特性及响应机制。

## L. 人工神经网络

*正如我所阐明，心灵既已获得大量由感官传递的简单观念——这些观念或源于外部事物，或源于对自身运作的反思——它同时注意到，其中若干简单观念总是相伴而生...，我们往往因疏忽大意，事后便将它们视为单一简单观念来谈论和思考。（约翰·洛克，《人类理解论》）*

人工神经网络（ANNs）旨在模拟生物神经网络的行为。最初开发ANNs的期望在于利用并行处理器计算优势，突破传统串行计算的局限。多年来，已开发出多种ANN模型及其配套的学习算法[50]。

佐佐木等人[49]探讨了利用霍普菲尔德神经网络解决组合优化问题（特别是无间歇性负荷）的可能性。该神经网络成功解决了包含30个负荷单元、跨越24个时段的无间歇性负荷问题，所得结果令人鼓舞。王春等[18]提出了一种适用于斜坡速率约束的无间歇性负荷人工神经网络模型。研究发现传统霍普菲尔德网络框架无法精确处理无间歇装卸问题。为此，Walsh 等人[80]提出增强型网络架构，采用新型神经元互联方式，并引入包含离散与连续项的通用能量函数。梁等人[108]则通过扩展均值场退火神经网络方法成功解决了该问题。

## M. 遗传算法

*我又见日光之下，快跑的未必能赢，力战的未必得胜，智慧的未必得粮，明哲的未必得资财，灵巧的未必得喜悦，所临到众人的，是在乎当时的机会。（《圣经·传道书》9章）*

过去三十年间，基于进化原理和机器学习的求解系统日益受到关注[116]，[134]：这类系统通过种群管理潜在解方案，采用基于个体适应度的选择机制及若干“遗传”操作符。其中一类代表是进化策略（即模拟自然进化原理解决参数优化问题的算法）。Fogel的进化策略...



遗传编程是一种在有限状态机空间中进行搜索的技术。格洛弗的散射搜索技术通过维持参考点种群, 并采用加权线性组合生成后代。另一类基于进化的系统是霍兰德的遗传算法[39]、[97]、[115]。1990年, 科扎提出基于进化的遗传编程系统, 旨在为特定问题寻找最适配的计算机程序[43], [140], [147]。

Sheble等人[39]将遗传算法应用于为期1至7天的单车共享问题。该研究验证了遗传算法在处理小规模与大规模单车共享问题时的可行性[27]。Maifeld等人[132]提出一种基于遗传算法的新型无约束调度算法, 采用特定领域的变异算子。通过与拉格朗日松弛无约束算法在不同公用事业场景的对比, 验证了该算法的鲁棒性。Yang等人[55]通过约束处理技术, 提出并行遗传算法方法解决无约束问题。Rudolf等人[8]提出解决水热电系统不确定性协调问题的遗传算法, 并在真实比例水热电系统上进行为期一天、以半小时为步长的多参数测试。Swarup等人[71]采用新型染色体表示与问题搜索空间编码策略, 该方法高效且能处理大规模不确定性协调问题。

## N. 进化编程

杨等人[51]和朱斯特等人[69]提出了一种用于统一协调问题的进化编程方法, 其中竞争解的种群通过随机变异、竞争和选择进行演化。陈等人[53]则提出了一种适用于统一协调问题的协同共进化算法。本文提出的算法是对传统进化编程[100]的扩展, 通过显式建模合作物种的协同进化, 该方法在构建和解决更复杂问题方面展现出巨大潜力。

## O. 蚁群搜索算法

蚁群算法基于蚁群的自然隐喻。真实蚂蚁能通过利用信息素而不依赖视觉线索, 找到从食物源到巢穴的最短路径。行进中的蚂蚁在地面释放信息素, 并概率性地追随先前蚂蚁留下的信息素。上述真实蚂蚁的行为**启发了蚁群系统**——该算法通过人工蚂蚁群体在图边上交换信息素信息, 协同解决问题。蚁群系统已被应用于组合优化问题, 如单元组合问题。在[87]中, Sisworahardjo和El-Kaib运用蚁群搜索算法解决了单元组合问题。同样, 在[124]中, Huang采用基于蚁群系统的优化方法解决了水力发电调度问题。

## P. 混合模型

通过文献综述发现, 现有统一通信算法亟需进一步改进。一方面, 算法可能简单但次优; 另一方面, 算法可能复杂但精确[95], [96], [101], [116]。因此, 要实现对现有算法的进一步改进, 必须将不同技术相互补充。主要做法是将多种算法融合形成混合模型以满足行业需求[56], [90], [144]。Su等人[25]针对无源负荷问题提出了一种新的模糊动态规划方法。该方法的显著特征在于: 通过模糊集符号处理小时负荷预测误差, 使其优于传统动态规划方法。类似地, Ouyang等人[54]研究了基于人工神经网络与动态规划的混合方法处理UC问题。该算法第一步利用神经网络根据输入负荷曲线生成预调度方案, 随后在部分机组承诺状态不确定的阶段进行动态搜索。欧阳等人[143]采用多级神经网络专家系统实现实时处理。神经网络分别应用于预处理和后处理阶段, 系统将运行约束转化为启发式规则, 通过推理获得可行解。黄等[125]提出基于遗传算法神经网络与动态规划的新方法。Mantawy等[3]整合了遗传算法、禁忌搜索与模拟退火算法。在[92]及N. P. Padhy的研究中, 专家系统、模糊系统被集成应用。

并结合神经网络实现实用化的无接触支付解决方案。

## VI. 结论

本文概述了统一通信(UC)问题的基本概念, 通过文献综述梳理了相关背景、实际需求、历史沿革、现状及技术方案。所列文献代表了当前工程界对下一代统一通信问题的典型思考。当前业界正形成明确共识, 即采用混合模型——融合经典与非经典方法, 以应对发达国家普遍存在的复杂统一计算问题。遗传算法、进化编程及蚁群优化技术尚未经过充分验证。本文基于过去30年发表的众多研究论文, 随着行业持续发展, 定期更新该领域的文献综述将具有重要价值。

## 参考文献

- [1] A. H. Mantawy, Y. L. Abdel-Magid, and S. Z. Selim, “基于禁忌搜索的机组调度”, 《英国电气工程师学会学报: 输配电分会》, 第145卷, 第1期, 第56–64页, 1998年1月。
- [2] ———, “用于机组调度的模拟退火算法”, 《IEEE电力系统汇刊》, 第13卷, 第197–204页, 1998年2月。
- [3] ———, “遗传算法、禁忌搜索与模拟退火在机组启停问题中的集成应用”, 《IEEE电力系统学报》, 第14卷, 第829–836页, 1999年8月。
- [4] A. I. Cohen, V. Brandwajn, 和 S. K. Chang, “开放市场中的安全约束机组调度”, 见《第21届IEEE电力工程学会国际电力工业计算机应用会议论文集》, 1999年, 第39–44页。

- [5] A. J. Wood 与 B. F. Wollenberg, 《发电、运行与控制》, 纽约: 威利出版社, 1996年。
- [6] A. L. Motto 与 F. D. Galiana, "含机组调度的拍卖市场均衡: 增强定价机制的必要性", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第17卷, 第798–805页, 2002年8月。
- [7] A. Merlin 与 P. Sandrin, "法国电力公司机组调度的新方法", 《IEEE 电力应用系统汇刊》, 第 PAS-102 卷, 第 1218–1225 页, 1983年8月。
- [8] A. Rudolf 与 R. Bayrleithner, "解决水电-火电系统机组调度问题的遗传算法", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第14卷, 第1460–1468页, 1999年11月。
- [9] A. I. Cohen 与 S. H. Wan, "解决燃料约束机组调度问题的方法", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第PWRs-2卷, 第608–614页, 1987年8月。
- [10] A. I. Cohen 与 M. Yoshimura, "用于机组启停的分支定界算法", 《IEEE 电力应用系统汇刊》, 第PAS-102卷, 第444–451页, 1983年2月。
- [11] A. I. Cohen 与 V. R. Sherkat, "基于优化的运行方法", 《IEEE 学报》, 第77卷, 第1574–1590页, 1987年12月。
- [12] B. F. Hobbs, S. Jitrapakulsarn, S. Konda, U. Chan-kong, K. A. Loparo, 和 D. J. Maratukulam, "改进负荷预测对机组调度价值的分析", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第14卷, 第1342–1348页, 1999年11月。
- [13] C. K. Pang 与 H. C. Chen, "短期热机组调度最优解", 《IEEE 电力应用系统汇刊》, 第 PAS-95 卷, 第 1336–1346 页, 1976年7月/8月。
- [14] C. K. Pang, G. B. Sheble, 和 F. Albu, "基于动态规划方法与多区域表示的热机组调度评估", 《IEEE 电力应用系统汇刊》, 第PAS-100卷, 第1212–1218页, 1981年3月。
- [15] 李昌、约翰逊、斯瓦博达, "一种新的机组调度方法", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第12卷, 第113–119页, 1997年2月。
- [16] C. Li, E. Hsu, A. J. Svoboda, C. Tseng, 和 R. B. Johnson, "水电优化中的水电机组调度", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第12卷, 第764–769页, 1997年5月。
- [17] C. Wang 与 S. M. Shahidehpour, "考虑转子疲劳效应的机组调度与经济调度中的斜率限制", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第9卷, 第1539–1545页, 1994年8月。
- [18] ———, "斜率限制对机组调度与经济调度的影响", 《IEEE 电力系统学报》, 第8卷, 第1341–1350页, 1993年8月。
- [19] C. L. Chen 与 S. L. Chen, "基于简化经济调度的短期机组调度", 《电力系统研究》, 第115–120页, 1991年6月。
- [20] C. 李, E. 徐, A. J. 斯沃博达, C. 曾, 和 R. B. 约翰逊, "水电-火电优化中的水电机组调度", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第12卷, 第764–769页, 1997年5月。
- [21] 李超、R. B. Johnson、A. J. Svoboda, "一种新的机组调度方法", 《IEEE 电力系统学报》, 第12卷, 第113–119页, 1997年2月。
- [22] C. Li, R. B. Johnson, A. J. Svoboda, C. Tseng, 和 E. Hsu, "水电优化中的鲁棒机组调度算法", 《IEEE 电力系统学报》, 第13卷, 第1051–1056页, 1998年8月。
- [23] 小C-W 里希特与G-B 谢布尔, "竞争环境下的基于利润的机组调度", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第15卷, 第715–721页, 2000年5月。
- [24] 程志平、刘志伟、刘志成, "基于拉格朗日松弛与遗传算法的机组调度", 《IEEE 电力系统学报》, 第15卷, 第707–714页, 2000年5月。
- [25] C.-C. Su 和 Y.-Y. Hsu, "模糊动态规划: 在机组调度中的应用", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第6卷, 第1231–1237页, 1991年8月。
- [26] D. Chattopadhyay 与 J. Momoh, "考虑机组调度与输电约束的多目标运行规划模型", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第14卷, 第1078–1084页, 1999年8月。
- [27] D. Dasgupta 与 D. R. McGregor, "基于遗传算法的热机组调度", 《英国电气工程师学会学报: 输配电分会》, 第141卷, 第459–465页, 1994年9月。
- [28] D. Zhai, A. M. Breipohl, F. N. Lee, and R. Adapa, "负荷不确定性对机组调度风险的影响", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第9卷, 第510–517页, 1994年2月。
- [29] E. 卡斯蒂略与E. 阿尔瓦雷斯, 《专家系统: 不确定性与学习》, 英国: 计算力学出版社, 1991年。
- [30] E. Handschin 和 E. Slomski, "具有长期能源约束的热力系统中的机组调度", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第5卷, 第1470–1477页, 1990年11月。
- [31] E. Tanlapco, J. Lawarree, 和 C. C. Liu, "电力行业自由化背景下的期货合约套期保值", 《IEEE 电力系统学报》, 第17卷, 第577–582页, 2002年8月。
- [32] F. Zhuang 和 F. D. Galiana, "基于拉格朗日松弛法的更严谨实用机组调度研究", 《IEEE 电力系统学报》, 第3卷, 第763–773页, 1988年5月。
- [33] F. N. Lee, J. Huang, 和 R. Adapa, "基于序贯法与直流功率流网络模型的多区域机组启停问题", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第9卷, 第279–287页, 1994年2月。
- [34] F. N. Lee 和 Q. Feng, "多区域机组启停问题", 《IEEE 电力系统学报》, 第7卷, 第591–599页, 1992年5月。
- [35] F. N. Lee, "燃料约束下的机组调度方法", 《IEEE 电力系统学报》, 第4卷, 第1208–1218页, 1989年8月。
- [36] ———, "机组启停率(CUF)在热力机组启停中的应用", 《IEEE 电力系统学报》, 第6卷, 第691–698页, 1991年5月。
- [37] F. N. Lee 与 Q. Chen, "带顺序重排的机组调度风险", 《IEEE 电力系统学报》, 第6卷, 第1017–1023页, 1991年8月。
- [38] F. N. Lee, "短期机组调度——新方法", 《IEEE 电力系统学报》, 第3卷, 第421–428页, 1988年5月。
- [39] G. B. Sheble 等, "基于惩罚方法的遗传算法机组调度及拉格朗日搜索与遗传算法的比较——经济调度实例", 《国际电力能源系统杂志》, 第18卷, 第6期, 第339–346页, 1996年2月。
- [40] G. L. Kusie 与 H. A. Putnam, "包含共同所有机组的调度与机组调度", 《IEEE 电力应用系统汇刊》, 第PAS-104卷, 第2408–2412页, 1985年9月。
- [41] G. Raina, S. Tong, 和 S. Nuelk, "机组调度应用增强现有能源管理系统", 《IEEE 计算应用电力》, 第6卷, 第35–39页, 1993年10月。
- [42] G. S. Lauer, N. R. Sandell Jr., N. R. Bertsekas, 和 T. A. Posbergh, "大规模最优机组调度问题的求解", 《IEEE 电力应用系统汇刊》, 第 PAS-101 卷, 第 79–96 页, 1982年1月。
- [43] G. F. Luger 与 W. A. Stubblefield, 《人工智能》。加利福尼亚州红木城: Benjamin Cummings出版社, 1993年。
- [44] G. B. Sheble 与 G. N. Fahd, "机组调度文献综述", 《IEEE 电力系统学报》, 第9卷, 第128–135页, 1994年2月。
- [45] G. B. Sheble 与 T. T. Maifeld, "基于遗传算法与专家系统的机组调度", 《电力系统研究》, 第115–121页, 1994年8月。
- [46] H. H. Happ, R. C. Johnson, 和 W. J. Wright, "大规模水电联合调度方法及结果", 《IEEE 电力应用系统汇刊》, 第 PAS-90 卷, 第 1373–1384 页, 1971年8月。
- [47] H. Ma 与 S. M. Shahidehpour, "带无功约束的机组启停分解法", 《电气工程师学会学报: 输配电分会》, 第144卷, 第2期, 第113–117页, 1997年3月。
- [48] H. Mori 与 O. Matsuzaki, "将优先级嵌入禁忌搜索的机组调度", 收录于 IEEE 冬季会议论文集, 2000年。
- [49] H. Sasaki, M. Watanabe, 和 R. Yokoyama, "基于人工神经网络的机组调度求解方法", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第7卷, 第974–981页, 1992年8月。
- [50] H. Sasaki, M. Watanabe, J. Kubokawa, N. Yorina 和 R. Yokoyama, "基于人工神经网络的机组调度求解方法", 收录于 IEEE 电力工程学会夏季会议论文集, 1991年。
- [51] H. T. Yang, P. C. Yang, and C. L. Huang, "基于进化编程的非光滑燃料成本函数机组经济调度", 《IEEE 电力系统学报》, 第11卷, 第112–118页, 1996年2月。
- [52] 马海、沙希德普尔·萨利姆·穆罕默德, "考虑输电安全与电压约束的机组调度", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第14卷, 第757–764页, 1999年5月。
- [53] 陈海、王晓, "机组启停的协同协同进化算法", 《IEEE 电力系统学报》, 第16卷, 第128–133页, 2002年2月。
- [54] X. Hindsberger 与 H. F. M. Ravn, "水热系统的多尺度建模", 载于《第22届IEEE 电力工程学会国际电力工业计算机应用会议论文集》, 2001年, 第5–10页。
- [55] H. Yang, P. Yang, 和 C. Huang, "解决机组调度问题的并行遗传算法方法: 在跨计算机网络上的实现", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第12卷, 第661–668页, 1997年5月。
- [56] 李华, 陈平, 黄辉, 《模糊神经网络系统》, 佛罗里达州博卡拉顿: CRC出版社, 2001年。
- [57] J. D. Guy, "安全约束下的机组调度", 《IEEE 电力应用系统汇刊》, 第PAS-90卷, 第1385–1389页, 1971年5/6月。
- [58] J. M. Arroyo 与 A. J. Conejo, "用于解决机组调度问题的并行修复遗传算法", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第17卷, 第1216–1224页, 2002年11月。
- [59] J. R. McDonald, G. M. Burt, J. S. Zielinski, 和 S. D. J. McArthur, 《电力工程中的智能知识系统》, 第1版。英国伦敦: 查普曼与霍尔出版社, 1997。

- [60] J. Valenzuela and M. Mazumdar, "电力现货市场交易条件下的机组调度决策", 收录于*IEEE 冬季会议论文集*, 2001年。
- [61] J. J. Shaw, "一种安全约束机组调度直接法", *IEEE 电力系统汇刊*, 第10卷, 第1329–1342页, 1995年8月。
- [62] K. Aoki, M. Itoh, T. Satoh, K. Nara, 和 M. Kanezashi, "包含燃料约束热电与抽水蓄能的大规模系统中长期机组调度优化", *《IEEE 电力系统学报》*, 第4卷, 第1065–1073页, 1989年8月。
- [63] K. Aoki, T. Satoh, and M. Itoh, "含燃料受限热电与抽水蓄能的大型电力系统机组调度", *IEEE 电力系统汇刊*, 第PWRS-2卷, 第1077–1084页, 1987年5月。
- [64] K. Ayoub and A. D. Patton, "热发电机组最优调度", *《IEEE 电力应用系统汇刊》*, 第PAS-90卷, 第1752–1756页, 1971年7/8月。
- [65] K. D. Lee, J. T. Day, B. L. Cooper, 和 E. W. Gibbons, "热电、水电及经济购电调度全局优化方法," *《IEEE 电力应用系统汇刊》*, 第PAS-102卷, 第1983–1986页, 1983年7月。
- [66] 原康夫、木村正、本田信夫, 《火力发电系统经济机组启停与维护规划方法》, *IEEE 电力应用系统汇刊*, 第PAS-85卷, 第427–436页, 1966年5月。
- [67] K. P. Wong 与 K. Doan, "热发电机组日调度的人工智能算法", *《英国电气工程师学会学报: 发电与输配电》*, 第138卷, 第6期, 第518–534页, 1991年。
- [68] K. P. Wong 与 Y. W. Wong, "短期水电调度第一部分: 模拟退火法", *《英国电气工程师学会发电输配分会会刊》*, 第141卷, 第497–501页, 1994年。
- [69] K. A. Juste, H. Kita, E. Tanaka 与 J. Hasegawa, "基于进化编程的机组启停问题解决方案", *《IEEE 电力系统汇刊》*, 第14卷, 第1452–1459页, 1999年11月。
- [70] K. D. Lee, R. H. Vierra, G. D. Nagel, 和 R. T. Jenkins, "不确定性条件下机组调度相关问题", *《IEEE 电力应用系统汇刊》*, 第 PAS-104 卷, 第 2072–2078 页, 1985年8月。
- [71] K. S. Swarup 与 S. Yamashiro, "基于遗传算法的机组调度求解方法", *《IEEE 电力系统汇刊》*, 第17卷, 第87–91页, 2002年2月。
- [72] K. Warwick, A. Ekwue, 和 R. Aggarwal, "电力系统的人工智能技术", *电气工程师学会电力工程系列*, 1997年。
- [73] K. Hussain, "机组启停限制与公用事业约束的求解方法," *《IEEE 计算应用电力学报》*, 第4卷, 第16–20页, 1991年1月。
- [74] K.-Y. 黄、H.-T. 杨、C.-L. 黄, 《基于约束逻辑编程的新型热机组调度方法》, *IEEE 电力系统交易*, 第13卷, 第936–945页, 1998年8月。
- [75] L. F. B. Baptistella 与 J. C. Geromel, "水电热系统机组启停计划分解法", *《英国电气工程师学会学报: 发电输配篇》*, 第127卷第6期, 第250–258页, 1980年。
- [76] M. E. Khan 与 R. Billinton, "复合发电输电系统中的发电机组调度", *《英国电气工程师学会学报: 发电输配分会》*, 第140卷, 第404–410页, 1993年9月。
- [77] M. Fotuhi-Firuzabad 与 R. Billinton, "考虑备用机组的复合发电输电系统机组调度健康分析", *《英国电气工程师学会发电输配分会会刊》*, 第146卷, 第164–168页, 1999年3月。
- [78] M. Madrigal 与 V. H. Quintana, "单元调度电力池拍卖中竞争均衡的存在性与确定性", 载于*《第22届IEEE电力工程学会国际电力工业计算机应用会议论文集》*, 2001年, 第253–257页。
- [79] M. Mazumdar 与 A. Kapoor, "发电系统生产成本的随机模型", *《电力系统研究》*, 第35卷, 第93–100页, 1995年。
- [80] M. P. Walsh 与 M. J. O. Malley, "用于机组调度与经济调度的增强型霍普菲尔德网络", *《IEEE 电力系统汇刊》*, 第12卷, 第1765–1774页, 1997年11月。
- [81] M. Madrigal 与 V. H. Quintana, "解决机组调度问题的内点/切割平面法", *《IEEE 电力系统汇刊》*, 第15卷, 第1022–1027页, 2000年8月。
- [82] ———, "发电机组调度电力池拍卖中竞争均衡的存在性与确定性: 定价与调度方案选择", *《IEEE 电力系统学报》*, 第16卷, 第380–388页, 2001年8月。
- [83] M.-S. Salam, A.-R. Abdul-Razak Hamdan, K. M. Khalid Mohamed Nor, "将专家系统集成到热力机组调度算法中", *《电气工程师学会学报C辑》*, 第138卷, 第553–559页, 1991年11月。
- [84] N. Chowdhury 和 R. Billinton, "基于概率技术的互联发电系统机组调度", *《IEEE 电力系统汇刊》*, 第5卷, 第1231–1238页, 1990年11月。
- [85] N. Misra 与 Y. Baghzouz, "超级计算机上机组调度问题的实现", *《IEEE 电力系统学报》*, 第9卷, 第305–310页, 1994年2月。
- [86] N. R. Jimenez 与 A. J. Conejo, "基于拉格朗日松弛法的短期水电协调: 对偶问题的解法", 载于*《IEEE 电力工程学会冬季会议论文集》*, 1998年。
- [87] N. S. Sisworahardjo 与 A. A. El-Kaib, "基于蚁群搜索算法的机组调度", 载于*《2002年大型工程系统电力工程会议论文集》*, 2002年, 第2–6页。
- [88] N. P. Padhy, "基于可靠风险储备与排放约束的新型模糊专家决策机组调度方法", *《能源环境》*, 第1卷, 第25–36页, 1999年11月。
- [89] N. P. Padhy 与 S. R. Paranjothi, "专家系统在短期机组调度问题中的应用", 载于*《全国系统会议论文集》*, 印度阿格拉, 1995年1月, 第443–447页。
- [90] N. P. Padhy, "机组调度问题的混合模型", 博士学位论文, 安娜大学, 印度金奈, 1997。
- [91] ———, "机组调度问题的机器学习分类系统", *《国际电力能源系统期刊》*, 第23卷第1期, 第49–61页, 2003年。
- [92] ———, "基于混合模型的机组调度: 动态规划、专家系统、模糊系统与遗传算法的比较研究", *《电力能源系统》*, 第23卷, 第827–836页, 2000年。
- [93] N. P. Padhy, V. R. Ramachandran, 和 S. R. Paranjothi, "用于机组调度风险分析的模糊决策系统", *《国际电力能源系统杂志》*, 第19卷, 第2期, 第180–185页, 1999年。
- [94] ———, "短期机组调度问题的模糊决策系统", 载于*《全国神经网络与模糊系统会议论文集》*, 印度金奈, 1995年3月, 第287–298页。
- [95] ———, "模糊专家系统的验证与确认: 应用于短期机组调度问题", 载于*《国际电气工程会议论文集》*第2卷, 中国, 1996年8月, 第1070–1073页。
- [96] N. P. Padhy, V. Ramachandran, 和 S. R. Paranjothi, "用于短期机组调度问题的混合模糊神经网络专家系统," *《国际微电子可靠性杂志》*, 第37卷, 第5期, 第733–737页, 1997年。
- [97] P. C. Yang, H. T. Yang, 和 C. L. Huang, "基于约束满足技术的遗传算法解决机组调度问题", *《电力系统研究》*, 第37卷, 第55–65页, 1996年。
- [98] P. G. Lowery, "动态规划生成机组调度方案", *IEEE 电力应用系统汇刊*, 第PAS-85卷, 第422–426页, 1966年5月。
- [99] P. R. MacGregor 与 H. B. Puttgen, "非公用事业发电与现货价格在公用事业发电调度中的集成", 载于*《IEEE 电力工程学会夏季会议论文集》*, 1994年。
- [100] P. Venkatesh, R. Gnanadass 与 N. P. Padhy, 《进化编程技术在线路流量约束下的联合经济排放调度中的比较与应用》, *IEEE 电力系统汇刊*, 第18卷, 第688–692页, 2003年5月。
- [101] P. P. J. Van Den Bosch 和 G. Honderd, "基于分解与动态规划的机组启停问题求解方案", *《IEEE 电力应用系统汇刊》*, 第PAS-104卷, 第1684–1690页, 1985年7月。
- [102] Q. Zhai, X. Guan, 和 J. Cui, "相同机组的机组调度: 基于拉格朗日松弛的递归子问题求解法", *《IEEE 电力系统交易》*, 第17卷, 第1250–1257页, 2002年11月。
- [103] R. Ferrero 与 S. M. Shahidehpour, "放松管制对受输电约束的水电热系统的影响", *《电力系统研究》*, 第38卷, 第191–197页, 1997年。
- [104] R. H. Kerr, J. L. Scheidt, A. J. Fontana 和 J. K. Wiley, "机组调度", *《IEEE 电力应用系统汇刊》*, 第PAS-85卷, 第417–421页, 1966年5月。
- [105] R. M. Burns 与 C. A. Gibson, "机组调度程序优先级别列表优化", 载于*IEEE 电力工程学会夏季会议论文集*, 1975年。
- [106] R. Nieva, A. Inda, 和 I. Guillen, "大规模机组调度中拉格朗日搜索范围缩减法", *《IEEE 电力系统汇刊》*, 第PWRS-2卷, 第465–473页, 1987年5月。
- [107] R. Nieva, A. Inda, 和 J. Frausto, "CHT: 解决短期水电协调与机组调度问题的数字计算机软件包", *《IEEE 电力应用系统汇刊》*, 第PAS-1卷, 第168–174页, 1986年8月。
- [108] 梁瑞华、康福昌, 《基于扩展均值场退火神经网络的火力发电机组启停调度》, *《英国电气工程师学会学报: 输配分会》*, 第147卷, 第164–170页, 2000年5月。
- [109] R. R. Shoults, S. K. Chang, S. Helmick, 和 W. M. Grady, "具有进出口约束的多区域电力池运行中机组启停、经济调度与节约分配的实用方法," *《IEEE 电力应用系统汇刊》*, 第PAS-99卷, 第625–635页, 1980年3月/4月。
- [110] R. Baldick, "广义机组调度问题", *《IEEE 电力系统学报》*, 第10卷, 第465–475页, 1995年2月。

- [111] R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad, S. Aboreshaid, "互联系统机组启停健康分析", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第12卷, 第1194-1201页, 1997年8月.
- [112] S. K. Tong 和 S. M. Shahidehpour, "拉格朗日松弛法与线性规划法联合处理燃料约束机组调度问题", 《英国电气工程师学会学报: 输配电分会》, 第136卷, 第162-174页, 1989年5月.
- [113] S. Li、S. M. Shahidehpour 与 C. Wang, "促进专家系统在短期机组调度中的应用", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第3卷, 第286-292页, 1993年3月.
- [114] 穆赫塔里, 辛格, 沃伦伯格, "机组调度专家系统", 《IEEE 电力系统学报》, 第3卷, 第272-277页, 1988年2月.
- [115] S. O. Orero 与 M. R. Irving, "电力系统发电机调度遗传算法", 《电力能源系统》第18卷第1期, 第19-26页, 1996年.
- [116] ——, "基于混合遗传算法的大规模机组调度", 《国际电力能源系统杂志》, 第19卷, 第1期, 第45-55页, 1997年.
- [117] S. Sen 与 D. P. Kothari, "热力发电机组最优调度: 综述", 《国际电力能源系统杂志》, 第20卷, 第7期, 第443-451页, 1998年.
- [118] S. Vemuri 和 L. Lemonidis, "燃料约束下的机组调度", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第7卷, 第410-415页, 1991年2月.
- [119] S. K. Tong 与 S. M. Shahidehpour, "基于分段法的概率约束水电热机组调度", 《IEEE 电力系统学报》, 第5卷, 第276-282页, 1990年2月.
- [120] S. Takriti 与 J. R. Birge, "基于整数规划优化拉格朗日法机组调度方案", 《IEEE 电力系统交易》, 第15卷, 第151-156页, 2000年2月.
- [121] S. Takriti, J. R. Birge, 和 E. Long, "机组启停问题的随机模型", 《IEEE 电力系统学报》, 第11卷, 第1497-1508页, 1996年8月.
- [122] S. Saneifard, N. R. Prasad, 和 H. A. Smollock, "基于模糊逻辑的机组启停方法", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第12卷, 第988-995页, 1997年5月.
- [123] 赖世扬与 R. Baldick, "基于斜坡系数的机组调度", 《IEEE 电力系统学报》, 第14卷, 第58-64页, 1999年2月.
- [124] 黄世杰, "基于蚁群优化方法的水电调度优化研究", 《IEEE 能源转换汇刊》, 第16卷, 第296-301页, 2001年9月.
- [125] 黄世杰与黄志良, "基于遗传神经网络的火力机组调度应用", 《IEEE 电力系统学报》, 第12卷, 第654-660页, 1997年5月.
- [126] S. Ruzic 与 N. Rajakovic, "解决扩展机组启停问题的新方法", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第6卷, 第269-277页, 1991年2月.
- [127] S. Sen 与 D. P. Kothari, "基于多区域机组调度方法评估印度电力系统跨区域能源交换效益", 《电气与机械电力系统》, 第26卷, 第801-813页, 1998年.
- [128] S. Virmani, E. C. Adrian, K. Imhof, 和 S. Muhherjee, "基于拉格朗日方法的机组调度问题实现", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第4卷, 第1373-1380页, 1989年11月.
- [129] T. J. Larsen, I. Wangensteen, 和 T. Gjengedal, "序贯时间步长机组调度", 见 *IEEE 冬季会议论文集*, 2001.
- [130] T. S. 迪伦、K. W. 埃德温、H. D. 科赫斯和 R. J. 陶德, 《基于整数规划的概率性备用容量确定下的最优机组调度问题》, *IEEE 电力应用系统汇刊*, 第PAS-97卷, 第2154-2166页, 1978年11/12月.
- [131] T. K. Siu、G. A. Nash 与 Z. K. Shawwash, "一种实用水力动力学机组调度与负荷模型", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第16卷, 第301-306页, 2001年5月.
- [132] T. T. Maifeld 和 G. B. Sheble, "基于遗传算法的机组调度算法", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第11卷, 第1359-1370页, 1996年8月.
- [133] U. D. Annakkage, T. Numnonda, 和 N. C. Pahalawaththa, "基于并行模拟退火的机组调度", 《电气工程师学会学报: 输配电分会》, 第142卷, 第595-600页, 1995年.
- [134] Y. R. Sood、N. P. Padhy 与 H. O. Gupta, "基于增强遗传算法的最优功率流讨论", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第18卷, 第1219页, 2003年8月.
- [135] W. J. Hobbs, G. Hermon, S. Warner, 和 G. B. Sheble, "用于机组调度的增强型动态规划方法", 《IEEE 电力工程评论》, 第70页, 1988年8月.
- [136] W. L. Snyder, Jr., H. D. Powell, Jr., 和 J. C. Rayburn, "动态规划法在机组调度中的应用", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第2卷, 第339-347页, 1987年5月.
- [137] X. Bai 与 S. M. Shahidehpour, "约束机组启停的扩展邻域搜索算法", 《国际电力能源系统杂志》, 第19卷, 第5期, 第349-356页, 1997年.
- [138] 关晓、卢培伯、严辉, "基于优化的机组启停方法", 《国际电力能源系统杂志》, 第14卷第1期, 第9-17页, 1992年2月.
- [139] 雷晓, 勒尔希, 谢志勇, "频率安全约束下的短期机组启停调度", 《电力系统研究》, 第60卷, 第193-200页, 2002年1月.
- [140] 马晓, 艾哈迈德·艾尔凯布, 罗伯特·史密斯, 马宏, "基于遗传算法的电力系统热机组调度方法", 《电力系统研究》, 第34卷, 第29-36页, 1995年.
- [141] Y.-Y. Hsu, C.-C. Su, C.-C. Liang, C.-J. Lin, 和 C.-T. Huang, "动态安全约束多区域机组启停调度", *IEEE 电力系统汇刊*, 第6卷, 第1049-1055页, 1991年8月.
- [142] 欧阳志, 沙希德普尔·S.M., "基于经济调度的启发式多区域机组启停", 《电气工程师学会学报: 输配电》, 第138卷, 第242-252页, 1991年5月.
- [143] ——, "基于混合神经网络-动态规划的机组启停方法", 《IEEE 电力系统汇刊》, 第7卷, 第236-242页, 1992年2月.
- [144] ——, "机组启停的多阶段智能系统", 《IEEE 电力系统学报》, 第7卷, 第639-646页, 1992年5月.
- [145] ——, "机组调度应用的智能动态规划法", 《IEEE 电力系统学报》, 第6卷, 第1203-1209页, 1991年8月.
- [146] ——《短期机组调度专家系统》, 《电力系统研究》, 第1-13页, 1990年12月.
- [147] Z. Michalewicz, 《遗传算法+数据结构=进化程序》第2版. 纽约: Springer-Verlag 出版社, 1992年.
- [148] A. Rajan, C. C. Mohan, M. R. Manivannan, "基于神经网络的禁忌搜索法解决机组启停问题", *第五届国际电力系统管理控制会议论文集*, 2002年, 第180-185页.
- [149] H. 森与 T. 宇佐美, "基于限制邻域禁忌搜索的机组调度", 载《智能系统在电力系统中的应用会议论文集》, 1996年, 第422-427页.
- [150] 林文铭、郑福生、蔡明泰, 《改进的禁忌搜索法处理具有多重极小值的经济调度》, *IEEE 电力系统学报*, 第17卷, 第108-112页, 2002年2月.
- [151] A. H. Mantawy, S. A. Soliman, 和 M. E. El-Hawary, "一种用于长期水力调度问题的新禁忌搜索算法", 发表于《大型工程系统电力工程会议论文集》, 2002年6月, 第29-34页.



纳拉亚纳·普拉萨德·帕迪于1990年和1993年分别获得印度马杜赖卡马拉吉大学电气工程学士学位和电力系统工程硕士学位（荣誉）。1997年，他在印度金奈安娜大学获得电气工程博士学位。

现任印度理工学院（IIT）鲁尔基分校电气工程系助理教授。1997年曾任印度比拉理工学院。教授课程涵盖基础电气工程、电力系统及人工智能。其研究涉及电力系统运行与优化问题中的应用，机组调度，电力系统跨区域输电，以及柔性输电系统（FACTS）。