

基于粒子群算法的施工现场变压器经济运行与负荷优化分配

解金矿

中能建建筑集团有限公司 安徽 亳州 230000

摘要：施工现场临时用电系统是建筑工程不可或缺的能源保障环节。针对临时用电系统负荷波动较大、三相不平衡严重、变压器长期偏离经济运行区间等问题，本文基于粒子群算法的变压器经济运行与负荷优化分配方法。通过建立以变压器综合功率损耗最小为优化目标的数学模型，同时计算有功损耗和无功损耗对系统总损耗的折算影响，并考虑容量、功率平衡以及三相不平衡度约束。根据施工现场负荷的强时变特性，提出适用于动态工况的滚动优化策略，有望为施工现场临时用电系统的节能降耗提供理论依据和工程实用的优化方法。

关键词：粒子群算法；施工现场；负荷优化分配；综合功率损耗

一、引言

随着施工进度推进，用电负荷呈现非平稳性和随机波动性。如何合理配置变压器容量、优化负荷分配以减少电能损耗、实现变压器经济运行，是施工现场临时用电管理的核心问题之一。

变压器经济运行得前提是在保证安全运行和满足用电需求的基础上，通过选取变压器的最佳运行方式、优化调整负荷分配以及改善运行条件等技术措施，来增强变压器输送能力、降低电能损耗。多数施工现场的变压器配置以经验估算作为选型依据，这种做法往往导致变压器长期处于轻载运行状态，损耗率大幅上升。同时，施工场地中单相负荷的大量使用容易引发三相不平衡问题，使变压器铜损增加并加速设备绝缘老化。

粒子群优化算法是一种源于对鸟群捕食行为研究的群智能优化方法，具有原理简洁、易于实现、无需梯度信息、参数少等优点，在电力系统经济负荷分配、最优潮流计算、无功优化控制等领域得到广泛应用，能够有效克服传统等微增率法，在处理离散变量和非线性约束时的局限性，为施工临时用电的智能化、精细化管理提供新的技术手段。

二、施工现场负荷特性及变压器经济运行的基本原理

2.1 施工现场负荷的时变特征与分配不均问题

随之施工阶段从土方开挖到主体结构再到装修安装的推进，用电设备的类型和装机容量会发生系统性变化。负荷分配问题有三个方面的：其一，单相负荷分布不均衡，电焊机、小型电动工具等大量单相设备若接入相序不当，会产生严重的三相电流不对称；其二，多台变压器并联运行时各变压器的负载率差异悬殊，造成部分变压器过载、部分轻载的“旱涝不均”局面；其三，功率因数偏低，大量感性

设备的运行使无功功率占用较大容量，进一步加剧了线路损耗。

2.2 变压器综合功率损耗模型

变压器的功率损耗包含空载损耗和负载损耗两部分。空载损耗主要来源于铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗，近似与电压平方成正比，在正常运行电压范围内基本保持恒定；负载损耗则包含绕组铜耗和附加损耗，与负载电流的平方成正比。为了全面评价变压器运行的经济性，不仅要考虑有功功率损耗，还需要计算因变压器消耗无功功率导致电网增加的有功损耗。计算公式如下：

$$P_z = P_{oz} + P_{kz} \times \left(\frac{S}{S_N}\right)^2$$

空载综合损耗： $P_{oz} = P_o + KQ \cdot Q_o$ ，负载综合损耗： $P_{kz} = P_k + K_Q \cdot Q_k$ ， $Q_o = 0.01I_0S_N$ 和 $Q_k = 0.01U_kS_N$ 分别给变压器空载无功损耗和短路无功损耗提供按百分比计， KQ 为无功经济当量，物理意义是单位无功功率在电力系统中所引起的有功损耗增量。引入综合功率损耗的意义在于，即便变压器的有功损耗不高，若无功消耗过大，通过电网传输后实际造成的有功损耗仍可能相当可观。

2.3 变压器经济运行的经济性评价

对施工现场而言，变压器的经济运行评价要多个维度综合考量。首先是电费支出，包括按有功电量计收的基本电费和按需量计收的基本电费；其次变压器的寿命周期成本，例如购置成本、运行损耗成本和维护检修成本；第三，变压器长期过载导致的绝缘加速老化、频繁投切对设备寿命的损害等间接损失。而变压器往往采用租赁方式，台数增减涉及租赁费用的调整，所以，经济评价必须把变压器台数变化所带来的固定费用变动与运行损耗变动统筹考虑。

三、基于粒子群算法的负荷优化分配模型

3.1 粒子群算法的基本原理

粒子群算法的核心思想是通过模拟鸟群觅食过程中个体与群体之间的信息共享与协作机制，实现搜索空间中的全局寻优。在算法的数学描述中，设第 i 个粒子在 D 维搜索空间中的位置向量为： $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ ，速度向量为： $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 。粒子在每一次迭代依据个体历史最优位置 p_{best} 和群体全局最优位置 g_{best} 来更新速度和位置。计算公式如下：

$$v_{id}^{k+1} = w \cdot v_{id}^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{best,id} - x_{id}^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g_{best,d} - x_{id}^k)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}$$

其中， w 为惯性权重， c_1 、 c_2 为加速常数， r_1 、 r_2 为服从[0,1]均匀分布的随机数。惯性权重 w 在算法中扮演着平衡全局搜索与局部搜索的角色—— w 较大时算法具有较强的全局搜索能力， w 较小时则侧重于局部精细化搜索。对于施工现场负荷优化动态性较强的问题，通常采用线性递减惯性权重策略，在迭代初期设置较大的 w 来充分探索解空间，随着迭代深入逐渐减小 w 来提高收敛精度。

3.2 优化目标函数的建立

针对施工现场并联变压器组的负荷分配问题，优化目标为在给定总负荷需求下，使整个变压器组的综合功率损耗最小，目标函数为：

$$\min F = \sum_{j=1}^n \left[P_{ozj} + P_{kzj} \cdot \left(\frac{S_j}{S_{Nj}} \right)^2 \right]$$

其中， n 为并联运行的变压器台数， S_j 为第 j 台变压器实际承担的负载容量， S_{Nj} 为其额定容量， P_{ozj} 和 P_{kzj} 分别为第 j 台变压器的空载综合损耗和负载综合损耗。

当优化问题扩展到包含变压器台数决策时，目标函数还需纳入变压器投切的固定成本因素，此时优化变量包括各变压器的投切状态 m_j （取 0 或 1）以及运行状态下各变压器的负载分配比例 λ_j （满足 $\sum \lambda_j = 1$ ），构成一个混合整数规划问题。

3.3 负荷优化分配模型约束条件

各变压器承担的负载总和应等于系统的总负载需求，即 $\sum S_j = S_{total}$ 。每台变压器的实际负载不得超过其额定容量，即 $S_j \leq S_{Nj}$ ，必要时可设置短时过载裕度，但需以设备安全为首要前提。施工现场临时用电规范对变压器低压侧三相电流不平衡度有明确限值要求，通常不超过 15%，因此，约束直接关系到电焊机 etc 单相设备的合理接入方案。另外，由于施工现场用电负荷波动频繁，若每次负荷变化都调整变压器运行台数，不利于系统稳定，还会大幅缩短开关设备的寿命。

3.4 粒子群算法求解流程与现场滚动优化策略

应用粒子群算法求解施工现场变压器负荷优化分配问题时，第一步，应该采集施工现场各配电回路的实时负荷数据，计算当前总负荷需求和功率因数；第二，根据现场变压器的铭牌参数（ P_o 、 P_k 、 I_o 、 U_k 等）计算各台变压器的综合功率损耗系数，建立优化模型；第三，初始化粒子群，每个粒子对应一组负荷分配方案；第四步，迭代更新粒子速度和位置，计算适应度函数值，直到满足收敛条件；第五，输出最优负荷分配方案，并指导现场运行调整。另外负荷的时变性和不确定性问题，可以采用滚动优化策略，在优化时段内基于实测数据完成优化计算，将最优方案应用于下一个较短的时间窗口，并进行滚动更新。在不显著增加计算负

担的前提下，较好地适应施工负荷的动态变化。

3.5 算法收敛性分析

在标准粒子群算法框架下，通过合理设置惯性权重递减策略和速度边界限幅，能够保证算法在有限迭代次数内收敛到全局最优附近的邻域。然而施工现场往往包含离散变量，此时目标函数不再具有凸性，标准粒子群算法会导致陷入局部最优。此时，可以对离散变量采用舍入取整方式处理，结合变异算子增强全局搜索能力。

五、结语

施工现场负荷预测的准确性和实时数据采集的可靠性直接影响优化效果；粒子群算法在处理大规模多变压器系统时的计算效率有待进一步提升。随着施工管理信息化水平不断提高，将粒子群优化算法与 BIM 技术、物联网监测系统相结合，构建施工现场临时用电的智能化优化管理平台，有望成为推动建筑业绿色低碳发展的重要技术路径。

参考文献

- [1]李芳,李伯群,崔阳.基于改进粒子群算法的电力系统无功优化[J].电力电容器与无功补偿,2026,47(02):70-79.
- [2]管晓峰,秦莉敏,徐海瑞,等.基于改进粒子群算法的分布式电源微电网多目标协同优化调度研究[J].信息与电脑,2026,38(07):53-55.
- [3]涂福荣,宋功益.基于改进多目标粒子群算法的配电网日前优化调度[J].兰州文理学院学报(自然科学版),2026,40(02):51-57.