

文章编号: 1000-8152(2001)01-0127-04

基于模拟退火算法的锌电解过程分时供电优化调度*

桂卫华 王雅琳 阳春华 黄泰松

(中南工业大学信息工程学院·长沙, 410083)

摘要: 依据电力部门的分时计价政策, 根据由生产过程数据所建立的不同酸锌比下电流密度与电流效率间关系, 建立锌电解过程分时供电优化模型. 同时, 提出一种带变异操作和变搜索空间的单循环模拟退火算法, 并将该算法应用于分时供电优化调度, 获得最优的分时供电方案. 工厂运行结果表明: 整个优化调度系统能显著降低锌电解过程的电耗并增加分时效益.

关键词: 锌电解过程; 分时供电调度系统; 模拟退火算法

文献标识码: A

Optimal Dispatching System of Time-Sharing Power Supply for Electrolytic Zinc Process Based on Simulated Annealing Algorithm

GUI Weihua, WANG Yalin, YANG Chunhua and HUANG Taisong

(College of Information Engineering, Central South University of Technology · Changsha, 410083, P. R. China)

Abstract: According to time-sharing price counting policy of electric power, the relationships of current density and current efficiency at different ratios of sulfuric acid and zinc are obtained through analyzing process data of electrolytic zinc process (EZP), and an optimization model of time-sharing power supply dispatching system (TPSDS) of EZP is established. An single-loop simulated annealing algorithm with mutation and variable searching spaces is proposed and applied to the TPSDS to obtain optimal time-sharing power supply scheme. Industrial practical results show that the optimal dispatching system can greatly decrease the power consumption of EZP and increase the time-sharing profits.

Key words: electrolytic zinc process; time-sharing power supply dispatching system; simulated annealing algorithm

1 引言 (Introduction)

在冶金行业, 锌电解过程是一个大的耗能过程, 所耗电量占整个锌湿法冶炼过程耗电量的 80%^[1]. 依据分时计价政策, 若在计价系数高的用电高峰段, 采用低电流密度生产, 计价系数低的用电低谷段, 采用高电流密度生产, 将显著降低锌电解过程的用电费用. 但若电流密度过高或过低, 将导致锌电解过程电耗高、电效低等情况. 为此, 综合考虑分时计价和锌电解生产状况, 获取最佳分时供电方案很有必要.

模拟退火算法 (SAA)^[2] 是基于金属物理退火机理和 Metropolis 算法^[3] 的一种随机搜索优化方法, 在概率意义上能为求得全局最优提供保证. 由于算法搜索过程缓慢, 工业实际应用困难. 一些学者针对算法优化速度由退火温度更新函数决定的特点, 通过构造新的温度更新函数^[4,5] 予以解决, 但仍未能解决算法长期陷于某局部最优点领域内无法跳出的情况. 为此, 通过对 SAA 搜索过程的分析, 针对搜索过程初期和后期两种不同情况, 提出一种带变异操作和变搜索空间的单循环模拟退火算法. 该算法实

际用于锌电解过程分时供电优化调度系统, 工业应用结果表明, 优化所得的合理分时供电方案用于指导锌电解生产, 为厂矿企业带来显著的经济效益.

2 锌电解分时供电优化模型 (The optimization model of time-sharing power supply of electrolytic zinc process)

电费计价一般基于四个时段. 在保证锌电解产量和质量的前提下, 为使锌电解生产全天的直流电费最低, 锌电解分时供电优化以全天直流耗电费用为优化目标, 求取四个不同时段的最优电流密度. 由此可得锌电解分时供电优化模型为

$$\min J = \min \left(\sum_{i=1}^4 p_i \times V_i \times D_{ki} \times S \times t_i \times n \right),$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} V_i = a_0 + a_1 D_{ki}, \\ \sum_{i=1}^4 q \times D_{ki} \times t_i \times n \times \eta_i = \text{const}, \\ \eta_i = b_0 + b_1 D_{ki} + b_2 D_{ki}^2 + b_3 D_{ki}^3 + b_4 D_{ki}^4, \\ D_{k\min} \leq D_{ki} \leq D_{k\max}, D_{ki} \text{ 为整数.} \end{cases} \quad (1)$$

* 基金项目: 国家 863/CIMS 应用基础研究 (863-511-9845-003) 资助项目.

收稿日期: 1998-10-26; 收修改稿日期: 2000-03-31.

其中 p_i 为第 i 时段的分时电价(元/(kW·h)); V_i 为电解槽的槽电压(V), V_i 与 D_{ki} 有关,根据生产数据可通过线性回归得到不同酸锌比下的回归系数 a_0 和 a_1 ; D_{ki} 为电流密度(A/m²); S 为电流所通过的面积(m²); t_i 为电解时间(h); n 为电解槽的槽数; q 为锌的电化当量, $q = 1.2202\text{g}/(\text{A}\cdot\text{h})$; η_i 为电流效率(%), η_i 与 D_{ki} 的关系是根据生产实验数据由四阶多项式回归获得,不同酸锌比下对应不同回归系数 b_j ($j = 0, 1, \dots, 4$), 为保证优化模型的正确性,采用带遗忘因子的递推最小二乘自适应学习策略在线获得回归系数; const 为锌日计划产量(t); $D_{k\min}$ 和 $D_{k\max}$ 为锌电解允许的最低和最高电流密度(A/m²),由工艺生产条件决定.

3 改进的模拟退火算法(Improved simulated annealing algorithm)

3.1 算法特点(Characteristics of algorithm)

模拟退火算法主要通过温度更新函数控制算法的收敛速度.构造新的温度更新函数,能解决算法搜索过于缓慢问题.文献[5]提出的模拟退火算法,采用退火温度与退火时间 m 次方成反比的温度更新函数,一定程度上提高了算法的计算效率.由于算法仅通过温度更新函数控制其收敛速度,未能很好解决搜索中可能长期隐于局部点无法跳出的情况.对模拟退火算法搜索过程分析可知:在搜索初期,退火温度较高,随机产生试探点的散布范围较大,接受新解的概率在很大程度上决定了搜索能否跳出局部解;而在搜索后期,退火温度较低,随机产生的试探点仅能集中在当前迭代点的局部范围,一旦陷入局部最优解将难以逃脱,随机搜索空间对于能否跳出局部解起决定作用.为此,本文基于文献[5]提出的模拟退火算法,针对算法搜索初期和后期两种情况,提出一种带变异操作和变搜索空间的单循环模拟退火算法.算法主要特点为:

1) 搜索初期引入变异操作,以退火时间的某一突变化例 P_m 使算法无条件接受新解.即搜索初期若算法长期隐于某一局部解的时间超过最大搜索时间 T_{\max} 的 P_m 倍,则不考虑接受概率,无条件接受新解,使算法跳出局部邻域.

2) 搜索后期,因为寻优已在局部范围内进行,无条件接受新解也不能跳出局部解邻域,为此通过一定程度的扩大搜索空间予以解决.具体作法是,搜索每隔一段很长的时间 T ,对初始退火温度 T_0 重新

赋值

$$T'_0 = \alpha T_0. \quad (2)$$

由文献[5]可知,产生新解的随机向量 Z^k 与退火温度 T_k 成正比,而退火温度 T_k 又与初始退火温度 T_0 成正比,因此若增加初始退火温度必将扩大随机产生试探点的散布范围,增加算法跳出局部解的可能性;同时因退火温度与退火时间 m 次方成反比,若初始温度赋值周期 T 较大,使退火时间 m 次方的增长远大于初始温度 T_0 的增加,则算法仅略减缓了退火速度,但仍能保证退火逐渐收敛.

3.2 算法实现步骤(Realization steps of algorithm)

对于 $\min_{x \in R^n} f(x)$ 的全局优化问题,提出的模拟退火算法按如下步骤实现:

Step 1 给定初始解 $x^0 \in R^n$ 和初始退火温度 T_0 ,定义最大搜索时间 T_{\max} ,时间突变比例 P_m 以及后期改进参数 T 和 α ,计算 $f(x^0)$,置 $X^0 = x^0$, $X_{\min} = x^0$, $f_{\min} = f(x^0)$, $k = 0$.

Step 2 按给定的概率密度函数

$$P(Z^k | T_k) = \prod_{i=1}^n \frac{T_k^{1/m}}{2m(|Z_i^k| + T_k)^{(m+1)/m}},$$

式中 Z^k 为第 k 次产生的随机向量, $Z^k = (Z_1^k, Z_2^k, \dots, Z_n^k)$; T_k 为第 k 次退火温度, $T_k > 0$; 产生一个随机向量 Z^k

$$Z_i^k = \text{sgn}(u_i) T_k \left(\frac{1}{|u_i|^m} - 1 \right), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

(3)

式中, u_1, u_2, \dots, u_n 为一组两两相互独立的在 $[-1, 1]$ 上均匀分布的随机变量, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数, T_k 为当前退火温度, m 为给定常数, $m \geq 1$. 利用当前迭代点 X^k 和随机向量 Z^k 产生一个新的试探点 $Y^k = X^k + Z^k$, 计算 $f(Y^k)$.

Step 3 产生一个在 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数 δ , 计算在给定当前迭代点 X^k 和温度 T_k 下接受 Y^k 的概率 $P_a(Y^k | X^k, T_k)$, 即

$$P_a(Y^k | X^k, T_k) = \min \left\{ 1, \exp \frac{f(X^k) - f(Y^k)}{T_k} \right\}.$$

若 $\delta \leq P_a(Y^k | X^k, T_k)$, 则置 $X^{k+1} = Y^k$, 否则 $X^{k+1} = X^k$, 若 X^{k+1} 值连续不发生变化的时间超过 $T_{\max} P_m$, 则置 $X^{k+1} = Y^k$.

Step 4 计算迭代次数 k , 若 k 是 T 的倍数, 则按式(2)对初始退火温度 T_0 重新赋值.

Step 5 若 $f(X^{k+1}) < f_{min}$, 则置 $X_{min} = X^{k+1}$, $f_{min} = f(X^{k+1})$, 若迭代终止条件满足, 则算法结束, X_{min} 作为全局最优解, 否则根据给定的温度更新函数

$$T_{k+1} = T_0/k^m, \quad k = 1, 2, \dots$$

式中, T_0 是初始退火温度, k 是退火时间, m 与式 (3) 中 m 一致. 产生一个新的温度 T_{k+1} , 置 $k = k + 1$, 转至 Step 2.

需要指出, 上述模拟退火算法只有一层循环, 在每一温度下只产生一个随机的试探点, 而传统的模拟退火算法有两层循环, 内循环在同一温度下产生一组随机的试探点, 外循环更新温度.

3.3 算法主要参数的选择 (Selection of main parameters)

算法的主要参数决定了算法的性能, 因此参数的选择非常重要. 基于文献 [5], 通过大量的仿真实验确定了以下一些参数的选择范围.

1) 初始温度 T_0 是退火的起始状态, 在一定程度上决定了退火速度和搜索范围, 越大越好, 一般取值较大, 以便能有一个较长退火过程. 通常取 $T_0 = 10^n, n = 6 \sim 8$.

2) 常数 m 对退火速度和搜索范围也有一定影响, m 大则退火时间短且搜索范围小, 而 m 小则退火时间长且搜索范围大, 一般取 $m = 2 \sim 4$.

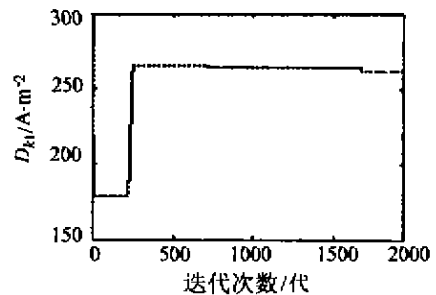
3) 初期突变比例 P_m 是算法在搜索初期跳出局部解的时间阈值比, 以最大搜索时间 T_{max} 为基准, 一般取 $P_m = 0.001 \sim 0.05, P_m$ 过小则算法接受新解过于频繁, 无法保证算法收敛; P_m 过大则解决算法长期陷于局部解的效果不很明显.

4) 后期突变周期 T 决定搜索后期退火温度突变的间隔时间, 一般 $T = 0.3 \sim 0.7 T_{max}$.

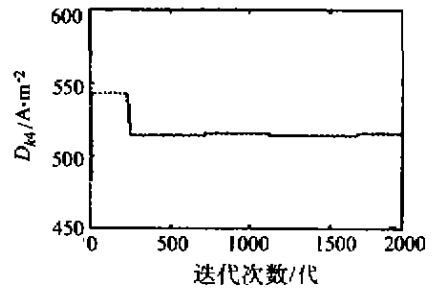
5) 初始退火温度突变率 α 一般应与 T 和 m 配合选取, 保证退火时间 m 次方的增长远大于初始温度的增加.

3.4 仿真研究 (Simulation)

对式 (1) 的优化模型分别采用本文和文献 [5] 提出的模拟退火算法进行寻优, 其中 $T_0 = 10^7, m = 3$, 另取 $T_{max} = 2000, P_m = 0.025, T = 0.4 T_{max}, \alpha = 10^3$, 初始值随机产生. 图 1 和图 2 为初始值 $D_k^0 = [279, 462, 491, 531]$ 时两种方法寻优所得的 D_{k1} 和 D_{k4} 的寻优曲线.



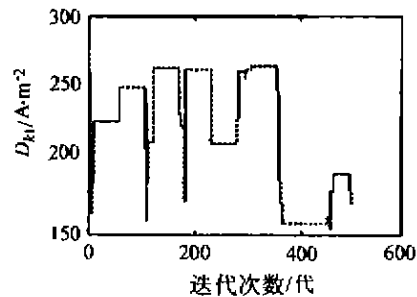
(a) D_{k1} 寻优曲线



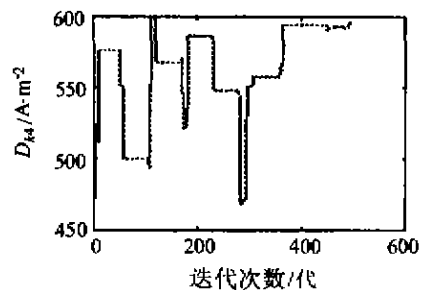
(b) D_{k4} 寻优曲线

图 1 文献 [5] 中的模拟退火算法

Fig. 1 SAA in reference [5]



(a) D_{k1} 寻优曲线



(b) D_{k4} 寻优曲线

图 2 本文的模拟退火算法

Fig. 2 SAA in the paper

由图 1 和图 2 可以看出, 本文提出的模拟退火算法在寻优过程不会长期陷于某一局部点无法跳出, 保证算法尽快地向满意点搜索, 提高算法寻优的可靠性和计算效率; 而由文献 [5] 算法搜索, 一旦陷入局部点无法跳出, 将无法保证算法搜索到满意点, 只能搜索 2000 极限次数后自然跳出.

此外, 为进一步说明本文提出算法的性能, 对不

同酸锌比下不同日计划产量的情况分别采用以上两种方法各进行 30 次实验,实验结果如表 1 所示.若优化 2000 次未满足寻优终止条件,认为该次优化失败;其中以优化满足终止条件所需的平均数作为衡量算法收敛速度的标准,以 30 次中失败的总数作为衡量算法可靠性的标准.

表 1 两种模拟退火算法寻优性能比较

Table 1 Performance comparison of two SAAs

酸锌比	日设计 产量/t	文[5]的		本文的	
		模拟退火算法 平均搜索 次数	未收敛 次数	模拟退火算法 平均搜索 次数	未收敛 次数
3.2	430	638.6	4	454.4	0
3.2	450	877.5	3	582.4	0
3.6	430	692.3	4	519.3	0
3.6	450	921.6	4	667.8	1

由表 1 可知,本文提出的模拟退火算法能有效提高算法寻优的可靠性和计算效率:

4 应用结果 (Application results)

本文提出的分时供电优化调度方法已成功地应用于某冶炼厂锌电解过程的电力负荷控制.该系统大幅度降低锌直流电单耗、提高分时效益,为厂矿企业带来了十分显著的经济效益.

参考文献 (References)

- [1] Yang Chunhua, Shen Deyao and Wu Min. Expert optimized control technique for electrolytic deposition process of by hydrometallurgy of zinc[J]. Trans. Nonferrous Metal Society China, 1997, 7(4): 133 - 137
- [2] Kirkpatrick S, Gellatt C D J and Vecchi M P. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220(4598): 671 - 680
- [3] Metropolis N, Rosenbluth A W and Rosenbluth M N. Equations of state calculation by fast computing machines [J]. The Journal of Chemical Physics, 1953, 21(3): 1087 - 1092
- [4] Ingber L. Simulated annealing; practice versus theory[J]. Mathematical and Computer Modeling, 1993, 18(1): 29 - 57
- [5] Yang Ruoli and Gu Jifa. An efficient simulated annealing algorithm for global optimization [J]. System Engineering Theory and Practice, 1997, 17(5): 29 - 35 (in Chinese)

本文作者简介

桂卫华 1950年生,中南工业大学信息科学与工程学院教授,博士生导师.目前主要研究方向是分散控制理论与应用,鲁棒控制,复杂生产过程建模与控制.

王雅琳 女,1973年生,1995年毕业于中南工业大学自动控制系,现为该系博士研究生.主要研究领域为复杂系统建模与优化控制,智能控制,进化计算等.

阳寿华 女,1965年生,副教授,在读博士生.于1988年在中南工业大学获硕士学位.研究领域为生产过程控制,智能控制理论与应用,复杂系统建模与优化控制.

黄泰松 1971年生,在读博士生.研究领域为复杂系统建模与优化控制,进化计算等.