

文章编号: 1009-038X(1999)04-0068-04

造纸厂热能负荷动态优化调度

高美凤, 须文波

(无锡轻工大学信息与控制工程学院, 江苏无锡 214036)

摘要: 建立了造纸厂能耗大的间隙式设备蒸球的动态优化调度模型, 对该模型运用隐枚举(IE)算法和扩充了接收新解准则的模拟退火(SA)算法, 分别进行了求解, 最后从给出的仿真结果证明了该模型和算法的有效性.

关键词: 负荷优化调度; 隐枚举算法; 模拟退火算法

中图分类号: TS733.2 文献标识码: A

造纸厂是轻工业的耗能大户, 需要消耗大量的电能和蒸汽等. 大中型造纸厂的每月电能消耗可达几万至几十万千瓦小时, 蒸汽的日消耗量也达到上百吨. 因此, 在造纸生产过程中, 利用计算机对水、电、蒸汽进行监测, 并与生产计划统一调度, 实施造纸厂能源的优化调荷控制, 就可较好地实现节能降耗的目的.

作者以造纸厂的大能耗间歇式生产设备蒸球为优化调度的对象, 建立了优化调度数学模型; 应用 IE 算法和 SA 算法分别对该模型进行求解, 同时根据该模型的特征, 对 SA 算法的接收新解的准则提出了修正 Metropolis 准则; 最后的仿真结果证明了该模型的实用性.

1 负荷优化调度的数学模型

蒸球是采用直接通入蒸汽将各种植物纤维原料加入化学药剂进行蒸煮, 除去原料中的木素, 使纤维离解成浆料的一种大能耗的间歇式生产设备. 其启动和停止的时间不确定, 对热能管网的冲击力最大. 当热能管网的负荷处于峰值期时, 蒸煮工序因气压不足而延长升温 and 保温时间, 直接影响了浆料的出产率和质量; 而当负荷处于低谷期时, 管网压力高涨, 不仅使管网热能损耗增加, 而且使生产设备由于过压过热而导致工艺参数的偏差. 以往情况只考虑浆料的供给, 而忽视了热能负荷的平衡, 从而使热能管网的蒸汽欠压或过压时有发生.

通过对造纸工艺的调研发现, 只要在生产的浆料满足实际需要的前提下, 对蒸球进行组合优化调度, 就能实现平衡热能管网负荷的目的. 即以蒸球是否需要启动作为变量, 满足蒸球生产过程的实际需要, 对蒸球进行优化调度, 使实际热能管网的瞬时总流量尽量接近额定流量. 于是建立蒸球的组合优化调度模型.

收稿日期: 1999-07-03; 修订日期: 1999-10-10

基金项目: 国家“九五”重点科技攻关项目(97-619-02)

作者简介: 高美凤(1963年9月生), 女, 江苏镇江人, 工学硕士, 讲师

对于蒸球的组合优化问题(记为问题 P):

给定 1) 蒸球的个数 n ;

2) 浆料的需求量 B ;

3) 热能管网中蒸汽的额定流量 q_{m1} ;

4) 热能管网中蒸汽的总瞬时流量 q_{m2} .

约束 生产的浆料必须大于或等于 B .

目标 热能管网中的蒸汽总流量尽量接近额定值.

定义变量 x_i ——第 i 个蒸球的状态(1 表示开, 0 表示不开);

a_i ——第 i 个蒸球启动一次生产的浆料;

q_i ——第 i 个蒸球启动后所需蒸汽的流量;

h_i ——各个蒸球申请启动的状态.

问题 P 的数学模型

$$f = \min \left[\sum_{i=1}^n h_i q_i x_i + q_{m2} - q_{m1} \right] \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^n h_i q_i x_i \geq B \quad (2)$$

$$x_i \text{ 为 } 0 \text{ (非启动) 或 } 1 \text{ (启动)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

2 求解方法

设组合优化问题有 n 个变量; $S = \{S_i\}$ 为所有解向量 S 的集合, $i = 1, 2, \dots, 2^n$; F 为目标函数; Ω 为所有约束条件的结合.

2.1 隐枚举算法(IE 算法)

IE 算法是寻求可行解的高效精确算法. 设组合优化问题有 n 个变量, 则可以产生 2^n 个可能的解向量, 而这 2^n 个可能的解向量中, 往往只有一部分是可行解. 在 IE 算法中, 当发现某一解向量不满足某个约束条件时, 就不再检验其它约束条件是否满足; 另外若发现一个可行解, 则根据它的目标函数值作为一个过滤条件 F^* , 对于 F 比 F^* 差的解向量就不必再去检验它的可行性, 在以后求解过程中始终以当前只有可行解的目标函数值代替 F^* ^[1]. 其算法如下:

- 1) 选取初始解向量 $S_1 = \{0, 0, \dots, 0\}$, 求出 F^* 作为过滤条件;
- 2) 产生一个解向量 S_i ;
- 3) 若 S_i 满足约束条件, 或目标函数值 F_i 优于 F^* 则转 4); 否则转 2);
- 4) 存当前所得最优解, $F^* = F_i, S^* = S_i$, 转 5);
- 5) 若遍历 S 则停止; 否则转 2).

2.2 模拟退火算法(SA 算法)

SA 算法是模拟金属构件退火过程的一种算法. 金属退火的处理过程是: 先用高温将其加热熔化, 使其中的粒子可以自由运动, 然后逐渐降低温度, 粒子的自由运动趋势也逐渐减弱, 并逐渐形成低能态晶体. 若在凝结点附近温度下降的速度足够慢, 则金属一定会形成最低能量的基态, 即最稳定结构状态^[2].

设组合优化问题的一个解向量 S_i 及其目标函数 F_i 分别与金属构件的一个微观状态 i

及其能量 E_i 等价, 则在 SA 算法中, 控制参数 t 相当于金属构件退火过程中的温度; 而对于控制参数 t 的每一取值, 算法持续进行“产生新解——判断——接收/舍弃”的迭代过程就对应着金属构件在某一恒定温度下趋于热平衡的过程; 当 t 趋于零时, 最终可求得组合优化问题的整体最优解. 控制参数 t 的初值 t_0 ; 控制参数 t 的衰减函数 $t_{k+1} = \alpha t_k$; Mapkob 链的长度 L_k (L_k 是 SA 算法中第 k 次迭代的次数) 和停止准则构成了 SA 算法的冷却进度表. 冷却进度表是一组控制算法进程的参数, 它能使 SA 算法在有限时执行过程后返回一个近似最优解.

SA 算法过程如下:

- 1) 随机选取初始可行解 S_0 , 并取较高的初始温度 t_0 ;
- 2) 令 $S_i = S_0$;
- 3) 随机产生一个新可行解 S_j , 计算 $\Delta f = f(j) - f(i)$;
- 4) 若 $\Delta f < 0$, 则令 $S_i = S_j$, 转入 6);
- 5) 若 $\Delta f \geq 0$, 则以转移概率 $\exp\left[-\frac{\Delta f}{t}\right]$ 接收新解 S_j . 即用随机数发生器产生一个 $[0, 1]$ 区间的随机数 ξ , 若 $\exp\left[-\frac{\Delta f}{t}\right] > \xi$, 则 $S_i = S_j$; 否则 S_i 保持不变;
- 6) 利用控制函数进行降温. 取 $t_{k+1} = \alpha t_k$, 其中 α 取 $0.5 \sim 0.99$ 之间;
- 7) 满足停止准则则转 8), 否则转 3);
- 8) 以当前 S_i 作为最优解输出, 结束算法.

2.3 接收新解的准则

SA 算法通常根据 Metropolis 准则对应的转移概率

$$P(i \Rightarrow j) = \begin{cases} 1 & f(j) \leq f(i) \\ \exp\left[-\frac{f(i) - f(j)}{t}\right] & f(j) > f(i) \end{cases}$$

确定是否接收新解. 式中 t 为控制温度, $f(i)$ 和 $f(j)$ 分别为当前解和新解的目标函数.

由于本文建立的蒸球优化调度模型是有约束且以两数之差作为目标函数的, 因此上述 Metropolis 准则不适用. 对此, 本文提出了修正 Metropolis 准则:

$$\begin{cases} p = 0 & \text{浆料的产量大于需求量} \\ p = 1 & \text{浆料的产量大于需求量, 且新解更优} \\ p = \exp\left[-\frac{|\Delta f|}{t}\right] & \text{否则} \end{cases} \quad (4)$$

该修正 Metropolis 准则可以使问题 P 在满足约束条件下, 目标函数充分接近于 0.

3 仿真结果

本节给出了问题 P 的仿真结果, 参照造纸厂蒸球优化调度的实际需求, 运用 IE 算法和 SA 算法对问题 P 进行求解, 得到图 1 和图 2 的曲线.

从图 1 所示的仿真结果可以看出, IE 算法的时间随着问题规模 n 的增大而急剧增加, 而 SA 算法时间增加很少, 当问题规模 $n = 13$ 时, 两者的计算时间相差了一个数量级. 图 2 显示出求精确解的 IE 算法所得解的质量较好. 考虑到造纸厂的生产实际, 在本文中求解蒸球调度的动态数学模型中运用了以下优化的方法: 当问题的规模 $n < 13$ 时, 采用 IE 算法进

行求解;当问题的规模 $n \geq 13$ 时,采用 SA 算法. 在 SA 算法中,取 $t_0 = 100, \alpha = 0.9, L_k = 10n$ (n 为蒸球的个数).

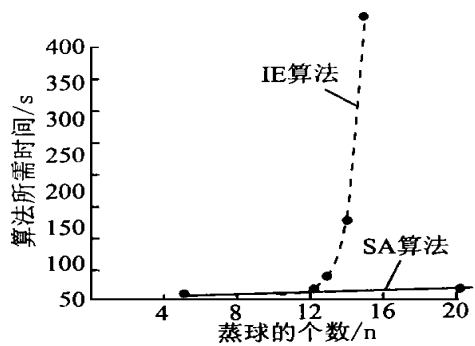


图 1 时间比较

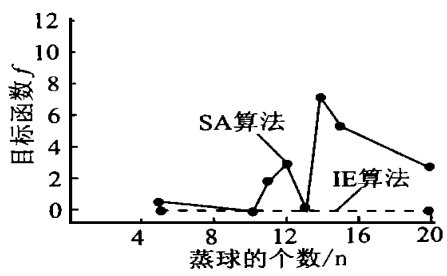


图 2 优化结果比较

另外,又收集了某造纸厂在 98 年 5 月至 9 月的数据,并进行仿真,得到图 3 所示的优化曲线. 图 3 结果表明,运用本文提出的对热能负荷进行动态优化调度,每月可以节约蒸汽约 3.0%.

4 结 论

该方案的实施不需要对现行设备进行改造,只要通过对热能消耗进行监视,就能事先对蒸球的动态优化调度. 仿真的结果表明,根据问题规模的大小,应用 IE 算法或 SA 算法的优化方法,可以提高解的质量,缩短求解时间;对蒸球进行动态优化调度,可以达到均衡用汽、合理用汽、节约能源的目的,具有一定的现实意义.

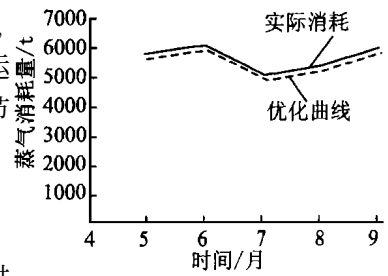


图 3 蒸汽实际消耗与优化结果

参考文献:

[1] 牛映武主编. 运筹学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1997.
 [2] 康立山, 谢云, 尤矢勇等著. 非数值并行算法(第一册)[M]. 北京: 科学出版社, 1994.

The Optimal Heat Energy Load Dynamic Scheduling for Paper Mill

GAO Mei-feng, XU Wen-bo

(School of Information & Control Engineering, Wuxi University of Light Industry, Wuxi 214036)

Abstract: In this paper, the dynamic model for optimal heat energy loads of digesters which consume more heat resource and have long interval is introduced. This model can be calculated using the implicit enumerate (IE) algorithm or the simulated annealing (SA) algorithm which accept criterion is expanded. The computer simulation results show that the model and algorithms are efficient.

Key words: optimal load scheduling, implicit enumerate algorithm, simulated annealing algorithm