2025-06-23

空压机台数优化调度研究_王文超

用气量负荷的预测

方法：用最小二乘支持向量机模型对未来 天的各时刻用气量进行负荷预测
改进：粒子群优化算法优化超参数

- LSSVM损失函数用误差平方和
- 核函数用来将数据投射到高维空间（核函数需要调）
    - 线性核函数
    - 多项式核
    - 径向基核
    - 感知器型核
    - RBF核函数

训练方法

在研究了SVM和LSSVM的原理之后，可以按照如下的流程来进行预测模型的而搭建：
（1）从历史数据中找输入变量，对数据误差校正，进行归一化的处理；
（2）形成训练样本矩阵；
(3) 确定参数C和σ; （C=120, 6 = 0.3）
(4) 通过训练样本，计算α和b的值，确定LSSVM的预测模型；
（5）对预定的一天24小时的负荷进行预测。

需要引入优化算法，来找超参数

在学习研究了LSSVM模型和PSO算法的基本原理之后，可以按照如下的思路来进行建模：
1.选取输入输出样本；
2.对样本数据进行预处理；
3.通过PSO算法进行参数C和δ优化选择；
4.将第三步获得的C和δ赋值给LSSVM模型进行仿真训练；
5.进行预测未来一天各时段负荷；
6.算法结束。

特征工程

经过负荷特性的分析，本文选取输入的样本为前一天星期类型、前一天同一
时段用气量、前两天同一时段用气量、当天的星期类型，后一天的星期类型，输
出样本为后一天24小时各个时段用气量，选取东风日产某工厂2016年10月到
11月连续三个星期的历史数据作为训练样本，一个星期的历史数据作为测试样本。

数据处理

- 缺失值：用最近2天的数据加权替换
- 异常值：
    - 水平处理：（相邻两个点）
        - 判断条件：左右相差超过10%
        - $$y(d,t)=\frac{y(d,t-1)+y(d,t+1)}{2}+y(d-1,t)$$
    - 垂直处理：（上下两天的同时刻）
        - 判断条件：设置一个阈值（平均值 - 当前数值》阈值）
        - 小于就平均值 +误差，大于就平均值 - 误差。

$$y(d,t)=\begin{cases}\bar{y}(t)+\theta, & y(d,t)>\bar{y}(t)\\ \bar{y}(t)-\theta, & y(d,t)<\bar{y}(t)\end{cases}$$

- 标准化：
    - 1.对数化（降低计算复杂度，统一数据分布）
    - 非数值类：
        - 编码后 - 再标准化
- 对预测结果做修调
    - 需要结合现场的工作经验作为先验知识
    - 提前获取一些计划（停电，突发情况）

最优的空压机组合

方法：建立了空压机机组组合的能耗模型
使用拉格朗日松弛结合微分进化算法——对——》机组能耗最小化问题求解

- 1.采用拉格朗日进行原问题的松弛构造
- 2.采用动态规划对单机问题求解
- 3.采用次梯度和微分进化算法进行解的可行化

- 4.负荷经济分配

领域内研究方法

1.优先次序法

- 1.先按照经济指标进行排序
- 2.根据系统的负荷需求和备用需求，优先确定开机顺序

  2.动态规划法
- 多阶段递推算法

  3.拉格朗日松弛算法
- 用拉格朗日函数求解，加入惩罚项（与设备相关的约束）
- 转化为单台设备的子问题，求解

  4.混合整数规划法
- 相比拉格朗日，可以得到全局最优解

  5.微分进化算法
- 搜索更全面，效率更高

空压机特性曲线

用来反映空压机参数间的关系。

通过多项式方程来表示特性曲线。通过最小二乘法拟合。

机组能耗模型建立

本小节将根据空压机使用情况和空压机的特性，进行机组组合能耗的模型建立，该模型变量既包括离散变量也包括连续变量，其中离散变量是指空压机运行状态，连续变量是指各台空压机产气量。通过文献分析并结合现场实际情况，给出相应的约束条件。

对于机组组合优化问题，可以依据调度周期内各时段各台机组能耗成本之和最小建立目标函数。能耗成本不仅包含机组运行成本而且包含机组启机时的启动成本。所以，该问题的目标函数为：

$$\min F\left(U_{i,t},Q_{i,t}\right)=\min\sum_{t=1}^{T}\left[\sum_{i=1}^{N}U_{i,t}F\left(Q_{i,t}\right)+U_{i,t}\left(1-U_{i,t-1}\right)S_i\right] \tag{4.5}$$

其中：

$U_{i,t}$：第 i 台空压机在 t 时段的运行状态；运行时：$U_{i,t}=1$，停机时：$U_{i,t}=0$；

$Q_{i,t}$：第 i 台空压机在 t 时段的产气量；

N：空压机机组台数；

T：机组调度周期；

S_i：第 i 台空压机由停机状态转换为运行状态产生的启动成本；

$F\left(Q_{i,t}\right)$：第 i 台空压机在 t 时段的运行成本。

总成本 = 每台机的运行成本 + 启动成本

成本（耗电量），与产气量相关

运行成本 = 产气量 和 电消耗的二次函数。

$$F\left(Q_{i,t}\right)=a_iQ_{i,t}^2+b_iQ_{i,t}+c_i$$

其中，a_i,b_i,c_i 为第 i 台空压机运行成本曲线系数。

启动成本用常数（简化模型）

约束条件

1.负荷平滑约束

$$\sum_{i=1}^{N} U_{i,t} Q_{i,t} = D_t$$

其中：D_t 是 t 时段的用气量。

就是t时刻的总用气量

2.负荷备用约束

就是保证预测误差不影响实际生产，误差在可承受范围内。不会因预测的误差，而造成用气量不足，影响设备运行。

$$\sum_{i=1}^{N} U_{i,t} Q_{i,\max} \geq D_t + R_t \tag{4.8}$$

其中：R_t 为 t 时刻负荷备用需求，$Q_{i,\max}$ 为第 i 台空压机的最大产气量，查阅资料选取空压机额定产气量的 80%。

选取系统负荷D_t的5%作为备用负荷R_t

3.单台机产气量约束

每台空压机存在稳定的产气量上下限

$$U_{i,t} Q_{i,\min} \leq Q_{i,t} \leq U_{i,t} Q_{i,\max} \tag{4.9}$$

其中：$Q_{i,min}$ 是第 i 台空压机最小产气量一般比喘振量稍大，一般留有 5%~10% 的额定产气量裕度[59]，$Q_{i,max}$ 是第 i 台空压机的最大产气量。

4.空压机启停次数约束

最小停机时间 = 避免设备频繁启停，损耗设备。每次关机都必须间隔一段时间后，才能再次开机。

$$\sum_{i=1}^{N}\left|U_{i,t}-U_{i,t-1}\right|\le M_i \qquad (i=1,2,\dots,N)$$

其中：M_i为空压机i每天最大允许停机次数，本文取$M_i=4$。

一般每天不超过4次

5. 0-1变量约束

用启停状态，来描述空压机状态。

若以$U_{i,t}$表示空压机i在时刻t的状态，1 表示运行状态，0 表示停机状态。

$$U_{i,t}=\begin{cases}1, & Q_{i,t}>0\\ 0, & Q_{i,t}=0\end{cases} \tag{4.11}$$

本文所研究的机组组问题属于典型的调度问题，机组组合调度所需要优化的变量既包括空压机运行状态这样的的离散变量，又包含各台空压机产气量这样的连续变量，所以这个模型是一个非线性混合整数规划问题。我们需要调度的是各个机组在调度周期内各个时间上的运行状态以及其在开机状态时的产量，并且需要通过算法优化这个调度。

拉格朗日松弛法

$$L(x,\lambda,\mu)=f(x)+\sum_{i=1}^{k}\lambda_i c_i(x)+\sum_{j=1}^{l}\mu_j h_j(x) \tag{5.2}$$

其中，λ_i和μ_i是拉格朗日乘子，并且其中$\lambda_i\ge 0$。

针对给定的一组拉格朗乘子，先进行极小问题的求解，然后从不同的极小值中筛选出最大的一个便是原问题的解。

根据上述的原理和方法，归纳出了利用拉格朗日计算的具体步骤如下：
步骤1：设定拉格朗日乘子的初值入,口；
步骤2：选取合适的求解子优化问题的方法，并代入入，P；
步骤3：进行条件判断判断是否满足迭代的停止条件，若满足条件，则输出优化结果，否则执行下一步；
步骤4：按照给定的式（5.7)和式（5.8)进行次梯度矢量的计算;
步骤5：根据式（5.9）计算下一次迭代的拉格朗日乘子的取值，并且返回到步骤2继续计算。

机组组合问题的拉格朗日模型

$$L(U,Q,\lambda,\mu)=F\left(U_{i,t},Q_{i,t}\right)+\sum_{t=1}^{T}\lambda_t\left(D_t-\sum_{i=1}^{N}U_{i,t}Q_{i,t}\right)+\sum_{t=1}^{T}\mu_t\left(D_t+R_t-\sum_{i=1}^{N}U_{i,t}Q_{i,\max}\right)\quad(5.10)$$

其中：λ_t 是 t 时段对机组组合中负荷平衡约束引入的拉格朗日乘子，μ_t 是 t 时段对机组组合中负荷备用约束引入的拉格朗日乘子。

求解思路：（极大极小值问题）

1.先求极小值（第一层）

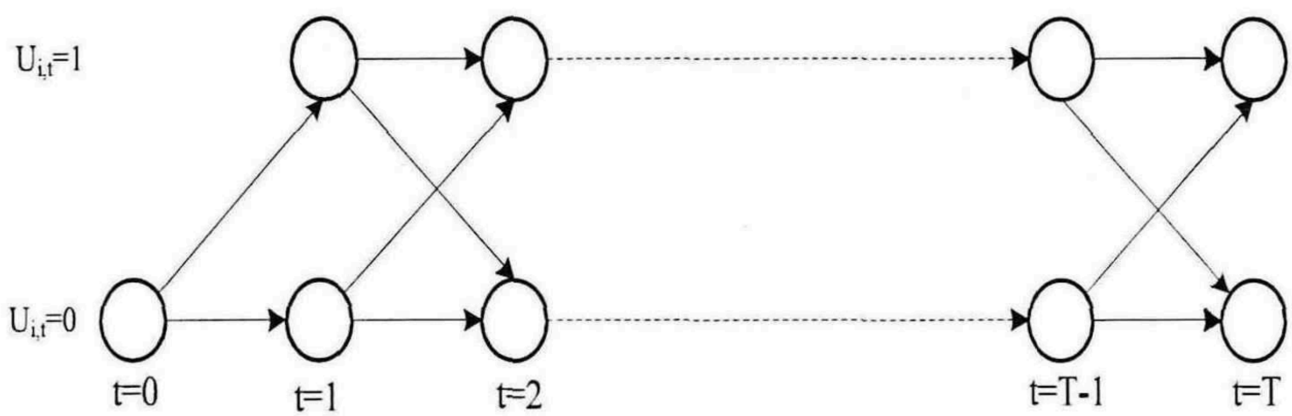
$$\min_{U_{i,t},Q_{i,t}} L_i=\sum_{t=1}^{T}\left[U_{i,t}F\left(Q_{i,t}\right)+U_{i,t}\left(1-U_{i,t-1}\right)S_i-\lambda_t U_{i,t}Q_{i,t}-\mu_t U_{i,t}Q_{i,\max}\right]\qquad(5.12)$$

2.再求极大值（第二层）

$$\max_{\lambda,\mu} L(\lambda,\mu)=\sum_{i=1}^{N}L_i^*+\sum_{t=1}^{T}\left[\lambda_t D_t+\mu_t\left(D_t+R_t\right)\right]$$

针对第一层问题：

采用动态规划，求解单机子问题。



如果t时段能耗成本= 0 ，则开机，否则不开机

表 5.1 状态转移表达式

Table 5.1 State transition expression

相邻两阶段机组状态	状态转移表达式
$U_{i,t-1}=1, U_{i,t}=1$	$\min\left[F(Q_{i,t})-\lambda_t Q_{i,t}-\mu_t Q_{i,\max}\right]$ $s.t.\quad Q_{i,\min}\le Q_{i,t}\le Q_{i,\max}$
$U_{i,t-1}=1, U_{i,t}=0$	0
$U_{i,t-1}=0, U_{i,t}=1$	$\min\left[F(Q_{i,t})-\lambda_t Q_{i,t}-\mu_t Q_{i,\max}+S_i\right]$ $s.t.\quad Q_{i,\min}\le Q_{i,t}\le Q_{i,\max}$
$U_{i,t-1}=0, U_{i,t}=0$	0

如果t时刻开机：

- t-1时刻开机：状态转移，找最小成本
- t-1没开机：状态转移， + t时刻开机的成本
  如果t时刻未开机：
- t-1时刻开机：因为t时刻关机了（产气量=0），所以此时运行成本（耗电量）为0
- t-1未开机：t没开，t-1也没开，所以运行成本也是0

每台设备的产气量计算公式：

$$
\begin{cases}
Q_{i,t}=Q_{i,\min}, & Q_{i,t}^{opt}<Q_{i,\min} \\
Q_{i,t}=Q_{i,t}^{opt}, & Q_{i,\min}\le Q_{i,t}^{opt}\le Q_{i,\max} \\
Q_{i,t}=Q_{i,\max}, & Q_{i,t}^{opt}>Q_{i,\max}
\end{cases}
$$

Q^opt : 代表t时刻的i设备的最优产气量
Q_min：代表每台设备的最小产气量
Q_max：代表每台设备的最大产气量

如果当前时刻的最优产气量

- 小于这台设备的最低产气量 ——》那么这台设备的产气量 = 最小值
- 超过最大产气量 ——》设备最大产气量

LR-DE优化算法
利用微分进化去代替次梯度优化算法去修正拉格朗日乘子

第一步，基本拉格朗日求取对偶解。应用拉格朗日松弛算法，引入拉格朗日乘子孔'和u'将系统约束耦合到机组组合能耗目标函数中构成拉格朗日函数，然后根据对偶原则，分成两层进行处理，仅考虑单机组约束，并通过次梯度法优化拉格朗日乘子，快速求解对偶问题，并获取一组乘子作为第二步微分进化的初始解恐和的。
第二步，微分进化算法更新拉格朗日乘子。采用DE的搜索全面，收敛速度快等特点，克服了次梯度更新的阶段性，合理的处理约束条件。得到第一步的初始解 和，利用微分进化算法在搜索空间范围内对拉格朗日乘子进行更新通过罚函数的方式处理系统约束，从而获得满足条件的最优组合。

最终的优化模型：

$$\begin{aligned} &\min F_c\left(Q_{i,t}\right)=\sum_{t=1}^{T}\sum_{n=1}^{N}a_iQ_{i,t}^2+b_iQ_{i,t}+c_i \\ &s.t.\quad \sum_{i=1}^{N}U_{i,t}Q_{i,t}=D_t \\ &U_{i,t}Q_{i,\min}\le Q_{i,t}\le U_{i,t}Q_{i,\max} \end{aligned} \tag{5.31}$$

其中 a_i,b_i,c_i 为第 i 台空压机运行成本曲线系数，$U_{i,t}$ 第 i 台空压机在 t 时段的运行状态，$Q_{i,t}$ 为第 i 台空压机在 t 时段的产气量，D_t 是在 t 时段用气量，$Q_{i,min}$ 表示第 i 台空压机的最小产气量，$Q_{i,min}$ 表示第 i 台空压机的最大产气量。

这里也是通过引入拉格朗日乘子 λ 将负荷平衡条件附加到 $F_c\left(Q_{i,t}\right)$ 中，也运用对偶理论对 $F_c\left(Q_{i,t}\right)$ 分层求解。

其中，拉格朗日乘子λ的更新策略如下：
1.当t时刻时所选的空压机机组最优产气量之和比用气量小，说明入值偏小，需要增大所选的空压机的产气量，可以设置入m=え。
2．当t时刻时所选的空压机机组最优产气量之和比用气量大，说明入值偏大，需要减小所选的空压机的产气量，可以设置入mx=λ。
3.将新得到的入m和入mx代入下一次的迭代中，使得最终各时段所选的空压机组最优产气量之和与用气量的大小相等。

负荷经济调度的具体步骤如下：
步骤1：对拉格朗日乘子λ进行初始化；
步骤2：计算当前选中机组的产气量：

$$Q_{i,t}^{*}=\frac{\lambda_{t}-b_{i}}{2a_{i}} \tag{5.38}$$

其中当 $Q_{i,t}^{*}<Q_{i,\min}$，则 $Q_{i,t}^{*}=Q_{i,\min}$；当 $Q_{i,t}^{*}>Q_{i,\min}$，则 $Q_{i,t}^{*}=Q_{i,\max}$；

步骤3：计算负荷平衡约束的偏差ε：

$$\varepsilon=D_{t}-\sum_{i=1}^{N}U_{i,t}Q_{i,t}$$

步骤4：根据偏差ε更新拉格朗日乘子λ，如果ε<0，则入=λ，若ε>0，
则入min=え;
步骤5：偏差8是否满足算法终止条件，满足时转向步骤6，不满时足转向步
骤 2:
步骤6：负荷经济调度完成，输出计算结果。

拉格朗日松弛算法求解空压机机组调度问题流程如下：
步骤1：进行拉格朗日松弛算法对原始问题进行松弛，形成对偶问题；
步骤2：初始化拉格朗日乘子2°,和p,，对偶解maxL，原始目标值minCost，
最小对偶间隙；
步骤3：动态规划算法分别求解单台空压机优化问题，求此时的U和Q：
步骤4：计算拉格朗日对偶函数值L，若L>maxL，则更新maxL=L；
步骤5：判断此时的U和Q是否满足负荷平衡和负荷备用为可行解，若是，
则转到步骤6，如不是则通过次梯度修正拉格朗日乘子转到步骤3；
步骤6：进行负荷经济分配计算，并进行计算原问题的日标函数值Cos1，若
Cost<minCost ，更新Cost;
步骤7：判断对偶间隙是否满足要求，若是满足，算法结束，若不满足则进
行微分进化算法修正拉格朗日乘子，并转到步骤3。

机组编号	a	b	c	$Q_{\min}$	$Q_{\max}$	S
1	0.0000012	0.097	16	0	1920	10
2	0.0000036	0.0965	23	0	1920	10
3	0.0000025	0.113	27	0	3840	20
4	0.0000014	0.109	22	0	3840	20

- a,b,c 由用气量和能耗数据拟合而成，是拟合函数的系数

-

$$F(Q_{i,t}) = a_i Q_{i,t}^2 + b_i Q_{i,t} + c_i$$

- Q代表产气量
  - 螺杆机：固定是从0到参数上限
  - 离心机：取额定值30%为下限，取额定值80%作为上限
- S代表启动成本
  - 可能是最大启停次数。设置一个固定常数（最大值）
- 选择系统负荷的5%作为备用容量（允许预测出现的误差）

计算出各时段的一个用气量负荷情况

时段	1	2	3	4	5	6
用气量	10702	12710	16192	16531	18215	17901
时段	7	8	9	10	11	12
用气量	17020	13193	31005	32064	32701	30858
时段	13	14	15	16	17	18
用气量	20120	31975	32749	32656	32145	31782

为了保证较优的计算效果，将LR-DE算法搜索的小邻域[x,一P.x,,+q]参数
@的设置为1，并对变异因子F和交叉因子C进行自适应调整，其中
F∈[0.4,0.8],C∈[0.3,0.8]，种群规模是50个，进化的迭代次数是200次。算法
终止条件中选取允许相对对偶间隙为0.001，其选取最大迭代次数也为200。机组
组合优化结果如表5.4，负荷分配优化结果如表5.5。

总结：

利用拉格朗日松弛分解难题，用动态规划高效求解子问题，用次梯度法引导乘子更新寻找对偶最优，用可行性检查捕获可行解提供上界，用经济负荷分配优化可行解质量，并用差分进化克服次梯度法的局部停滞问题，加速收敛或找到更好解。

空压机机组智能调度优化技术报告

——基于拉格朗日松弛-差分进化混合算法

一、问题定义

目标：在满足工厂用气需求 (D(t)) 和备用气量要求 (R(t)) 前提下，调度多台空压机（编号 (i=1,2,...,N)）的**启停状态 (U_i(t))** 和**输出气量 (Q_i(t))**，实现总能耗成本最低。
核心约束：

1. **负荷平衡**：($\sum_{i=1}^{N} Q_i(t) = D(t)$（实时供气=需求）
2. **负荷备用**：($\sum_{i=1}^{N}[Q_i^{\max} - Q_i(t)] \geq R(t)$)（备用气量≥要求）
3. **设备约束**：启停次数限制、最小运行时间、气量调节范围等。

二、算法流程详解

步骤1：问题分解（拉格朗日松弛）

- **原始问题**：耦合约束（负荷平衡/备用）导致计算复杂度过高。
- **松弛方法**：
  将约束 \($\sum Q_i(t) = D(t)$ \)和\($\sum[Q_i^{\max} - Q_i(t)] \geq R(t)$ \) 加入目标函数，引入**惩罚价格 ($\lambda(t)$)**（拉格朗日乘子）：

  $$\text{新目标} = \text{总能耗成本} + \lambda(t) \cdot (\sum Q_i(t) - D(t))$$

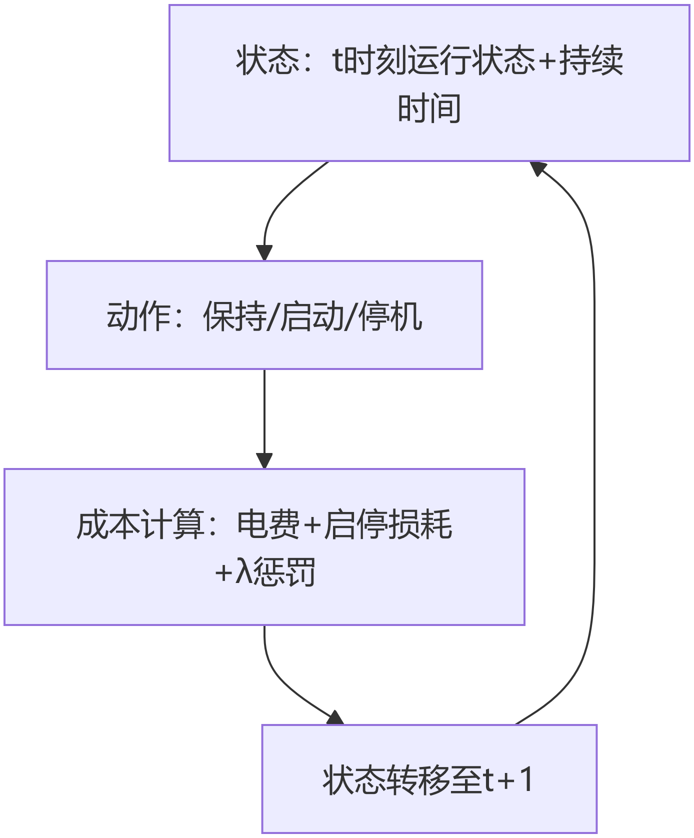
  效果：原问题分解为 (N) 个独立的**单空压机优化子问题**。

步骤2：初始化参数

参数	符号	说明	初始值
拉格朗日乘子	($\lambda^0(t)$)	惩罚价格曲线	全零向量
步长参数	(ρ)	乘子调整幅度	0.5~2.0
最优下界	($maxL$)	理论最低成本估计	(-\infty)
最优上界	($minCost$)	实际可行方案最低成本记录	(+\infty)

步骤3：单空压机动态规划求解

- **输入**：当前惩罚价格 ($\lambda(t)$)、设备参数（功率曲线、启停损耗等）。
- **求解内容**（每台空压机独立计算）：
  - **状态变量**：运行状态（0/1）、已连续运行时间、当前时段 (t)
  - **决策变量**：(U_i(t))（启停），(Q_i(t))（输出气量）
- **输出**：全周期（如24小时）最优启停序列 (U_i) 和气量曲线 (Q_i)。



步骤4：更新理论成本下界（maxL）

计算松弛问题的目标值 ($L = \sum \text{单机成本} + \lambda(t) \cdot (\sum Q_i(t) - D(t))$)
若 (L > maxL)，则更新 (maxL = L)（**逼近理论最小成本**）。

步骤5：可行性验证与乘子修正

- **验证条件**：
  - 负荷平衡：($|\sum Q_i(t) - D(t)| \leq \varepsilon$)
  - 负荷备用：($\sum [Q_i^{\max} - Q_i(t)] \geq R(t)$)
- **结果处理**：
  - **可行**：跳转步骤6；
  - **不可行**：用**次梯度法**更新乘子：
    [
    $\lambda^{\text{new}}(t) = \lambda(t) + \rho \cdot \frac{(maxL^* - L)}{\|\sum Q_i(t) - D(t)\|^2} \cdot (\sum Q_i(t) - D(t))$
    ]
    返回步骤3重新求解。

步骤6：经济分配与实际上界更新

- **经济分配模型**：固定可行启停方案 (U_i(t))，优化气量 (Q_i(t))：
  [
  $\min \sum \text{能耗成本} \quad \text{s.t.} \quad \sum Q_i(t) = D(t),\ Q_i^{\min} \leq Q_i(t) \leq Q_i^{\max}$

]
（凸优化问题，可快速求解）

- **更新实际上界**：若新成本 (Cost < minCost)，则 (minCost = Cost)。

步骤7：收敛判断与全局优化

- **停止条件**：对偶间隙 ($\text{Gap} = \frac{minCost - maxL}{minCost} \leq 0.5\%$)。
- **未收敛时**：调用**差分进化算法（DE）**：
  - **种群**：生成多组拉格朗日乘子曲线 (\lambda(t))；
  - **变异/交叉**：组合优质乘子序列；
  - **选择**：保留使 (L(\lambda)) 更大的乘子；
  - **输出**：新一代 (\lambda(t)) 返回步骤3。

五、实施流程

1. **数据采集**：实时气量需求 (D(t))、设备性能曲线、电价。
2. **参数配置**：设置约束条件（备用率、启停限制）。
3. **算法求解**：自动生成调度方案（启停计划+气量分配）。
4. **系统集成**：对接空压机群控系统执行指令。