# 三、问题分析

第一小问解决办法，清洗成本为2的时候，如何对清洗时间节点进行动态决策

之前的模型中，使用了双阶段归因模型（TACA），第一阶段预测理论发电量，第二阶段计算DI，并结合滑动窗口的均值和标准差来触发预警。现在的问题是如何在经济性考虑下，动态决定清洗时间，即在积灰导致的发电损失和清洗成本之间找到平衡点，最大化净收益。将经济因素整合到模型中。主要思路是当累积的发电损失超过清洗成本时，进行清洗。但需要考虑时间因素，因为发电损失是随时间累积的，而清洗成本是固定支出。因此，动态决策的关键在于实时计算累积损失，并与清洗成本比较，当累积损失达到或超过清洗成本时，触发清洗。

但是，这里可能会有问题，比如频繁的小额损失累积可能很快超过清洗成本，但实际上可能因为天气变化，后续的损失可能减少。因此，可能需要结合预测未来的发电损失，而不是仅看历史累积。不过考虑到实时性和复杂性，可能还是基于历史数据和当前DI趋势进行决策更为实际。

定义净收益为发电收益减去清洗成本。目标是最大化长期净收益，因此需要在每次清洗时，保证清洗后的收益增益超过成本。

具体来说，清洗的时机应选择在累积损失刚好超过清洗成本的时刻，这样可以最大化两次清洗之间的净收益。

但实际操作中，需要实时监控累积损失，并在达到阈值时触发清洗。这需要实时计算从上次清洗后的累积损失，并与清洗成本比较。

因此，动态决策的算法可能如下：

1. 记录上次清洗时间t\_last。

2. 计算从t\_last到当前时间t的累积发电损失L(t)。

3. 如果L(t) ≥ C\_clean（清洗成本），则触发清洗。

4. 否则，继续监测。

但需要考虑DI的趋势，如果DI在短期内快速上升，可能预测未来损失会增加，从而提前清洗。不过这可能涉及预测模型，增加复杂性。作为初步方案，可以仅基于当前累积损失。

不过用户之前的模型中已经计算了DI的滑动均值和波动，可能需要结合这些指标来优化触发条件，比如当累积损失接近清洗成本，并且DI均值较高、波动较低时，认为积灰严重，触发清洗。

例如，当累积损失达到清洗成本的80%，并且DI均值超过阈值，且波动低于阈值时，提前清洗，以避免损失进一步扩大。

或者，设置两个条件：经济触发（累积损失≥C\_clean）和安全触发（DI均值超过安全阈值），任一条件满足即清洗。

这样可以在保证经济性的同时，防止极端情况下的过度损失。

总结一下，动态决策的逻辑可能包括：

- 经济触发：累积损失 ≥ 清洗成本

- 安全触发：DI均值超过安全阈值（20%）

3.2对问题三的分析

本问需在清洗成本固定为2的条件下，制定光伏板清洗时间节点的动态决策策略，核心目标是平衡积灰导致的发电损失与清洗支出，实现电厂长期收益最大化。结合题意与参考思路，需构建经济性驱动的实时决策框架，任一条件满足时均进行清洗。。

动态决策需关注两大变量：累积发电损失L(t)与清洗成本C\_clean=2。其中，L(t)表示从上一次清洗至当前时刻因积灰造成的收益损失总和，其随时间推移逐步增加；C\_clean为固定值，代表单次清洗所需的经济投入。决策逻辑为：当L(t)达到或超过C\_clean时触发清洗，避免因积灰导致的净收益损失。同时结合积灰程度指标DI的滑动均值（*DI*）与波动率（*σDI*​），若*DI*持续高于20%且*σDI*​低于5%，则判定积灰进入稳定高风险期，需主动缩短清洗间隔。

为提升决策合理性，我们决定引入经济触发条件和安全触发条件的双重约束条件：

在经济触发条件中，触发条件为L(t)≥C\_clean。实时监测L(t)，当其累积值首次超过2时立即清洗，防止小额损失频繁累积引发成本倒挂；在安全触发条件中，触发条件为*DI*超过安全阈值。模型通过滑动窗口动态更新，结合积灰程度指标（DI）的均值与波动率，使决策紧跟积灰趋势变化。若DI均值持续高于安全阈值（如20%）且波动率低于临界值（如5%），则提前清洗以规避极端天气导致的突发损失。

变量

原文：

* *L*(*t*)：从上次清洗时刻*t*last​到当前时刻*t*的累积发电损失；
* *DI*mean​(*t*)：滑动窗口内DI均值，反映积灰趋势；
* *DI*std​(*t*)：滑动窗口内DI标准差，反映积灰稳定性；
* *C*clean​=2：单次清洗成本；
* *R*(*t*)：净收益函数，定义为发电收益与清洗成本之差。
* 上次清洗时间 t\_(last\_clean)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 决策变量 | *tclean*​ | 清洗时间节点 | - |  |
| 状态变量 | *DI*(*t*) | 积灰程度指标 | - |  |
| 状态变量 | *Pactual*​(*t*) | 实际发电功率 | kW |  |
| 状态变量 | S(*t*) | 累积损失 | 元 |  |
| 参数 | *Cclean*​ | 清洗成本 | 元/次 |  |
| 参数 | *pelectric*​ | 电价 | 元/kWh |  |
| 参数 | *θsafe*​ | 安全性阈值 | - |  |

对问题三的模型建立和求解

模型建立

光伏板因积灰导致的发电损失可以表示为：

*L*(*t*)=*DI*(*t*)⋅*Pideal*​(*t*)⋅*pelectric*​⋅Δ*t*

**累积损失模型**

损失即为成本，包含两部分，清洗成本和累积发电损失成本。

清洗成本为：*C*clean​=2元/kW×装机容量

从上一次清洗时刻*tlast*\_*clean*​到当前时刻*t*的累积发电损失成本为：

S(*t*)=∑*i*=*tlast*\_*clean*​*t*​*L*(*i*)

为了简化计算，我们可以将求和转化为积分形式（当时间间隔Δ*t*趋近于0时）：

*S*(*t*)=∫*tlast*\_*clean*​*t*​*DI*(*τ*)⋅*Pideal*​(*τ*)⋅*pelectric*​*dτ*

**清洗决策模型**

**经济性触发**：当累积损失*S*(*t*)达到或超过单次清洗成本*Cclean*​时，触发清洗操作。即：  
*S*(*t*)≥*Cclean*​**；安全性触发**：当积灰程度指标*DI*(*t*)超过安全性阈值*θsafe*​时，无论累积损失是否达到清洗成本，都立即触发清洗操作。即：*DI*(*t*)>*θsafe*​，其中，经济性触发优先于安全性触发。但安全性触发作为极端情况的保底条件，确保光伏板的安全运行。

**目标函数**

模型的目标是最小化总运营成本，即最小化长期运行过程中的平均每小时运营成本。总运营成本包括发电损失成本和清洗成本。

我们可以将目标函数表示为：

minlim*T*→∞​*T*1​(∫0*T*​*L*(*t*)*dt*+∑*k*=1*N*​*Cclean*(*k*)​)

其中：*T*：总运行时间；*N*：在总运行时间*T*内进行的清洗次数；*Cclean*(*k*)​：第*k*次清洗的成本。

模型求解

由于清洗决策是离散的（在特定时间点进行清洗），而积灰程度和发电损失是连续变化的，因此这个问题可以看作是一个混合整数规划问题。然而，直接求解混合整数规划问题可能较为复杂。为了简化求解过程，我们可以采用启发式算法或动态规划方法。

我们可以将时间划分为离散的时间段，并在每个时间段结束时根据当前状态的积灰程度、累积损失决定是否进行清洗。

**计算累积损失**

从上次清洗时间开始，逐小时累加发电损失：

S(t)=S(t−1)+DI(t)⋅Pactual(t)⋅pelectric*S*(*t*)=*S*(*t*−1)+DI(*t*)⋅*P*actual​(*t*)⋅*p*electric​

**积灰程度随时间变化函数***f***的确定**

积灰程度随时间的变化函数*f*需要根据实际的气象条件和光伏板的特性来确定。可以通过历史数据分析或实验测量来拟合该函数。例如，可以假设积灰程度随时间呈指数增长：

*DI*(*t*+Δ*t*)=*DI*(*t*)+*k*⋅(1−*DI*(*t*))⋅Δ*t*

其中，*k*为积灰速率常数，与气象条件（如风速、降雨量、空气质量等）有关。

最终得到：**经济性触发**：当 S(t)≥9996.6 元*S*(*t*)≥9996.6元 时立即清洗；

**安全性触发**：当7日均值 DI‾W(t)>20%DI*W*​(*t*)>20% 时强制清洗（防止极端积灰）。