

## 说明书摘要

---

本发明涉及摄像头清洁技术领域，具体公开了一种车辆外部摄像头清洁系统及方法，通过建立基准图像并实时比对，精准识别污染类型与严重程度，驱动连续式透明保护膜按规划的速度曲线单向位移，以洁净膜区直接替代受污染区域，实现了无需外部介质的自适应精准清洁；同时，位移动作与导流及边缘密封结构协同，将液态污染物有序排出膜后间隙，消除了积液隐患；配合位移后的图像复评与补偿策略，确保了在各种复杂工况下成像通路的快速恢复与长期稳定，显著提升了系统的自主运行能力和可靠性。

## 摘要附图



1. 一种车辆外部摄像头清洁方法，其特征在于，包括：

建立覆盖于摄像头光学窗口外侧的连续式透明保护膜处于洁净状态时的基准图像；

实时采集当前图像，将所述当前图像与所述基准图像进行比对，基于图像质量退化程度判定光学窗口是否被泥浆、雨水、虫体或污渍遮挡；

若判定被遮挡，则对遮挡区域进行特征提取，识别污染类型并计算遮挡严重程度，根据所述污染类型和遮挡严重程度生成连续式透明保护膜的位移指令，所述位移指令包含位移方向、位移距离及速度曲线；

控制执行机构按照所述位移指令驱动连续式透明保护膜单向位移，使洁净膜区替代受污染区域；

在连续式透明保护膜位移过程中，通过镜头安装界面的导流与边缘密封结构将液态污染物导向并排出膜后间隙；

位移完成后重新采集图像，评估图像质量是否恢复至基准水平，若未恢复则触发补偿清洁策略。

2. 根据权利要求 1 所述的车辆外部摄像头清洁方法，其特征在于，建立所述基准图像包括：校准连续式透明保护膜的初始位置，采集多帧洁净状态图像进行平均处理，提取图像的平均梯度值、局部对比度分布及色度饱和度均值构建基准特征向量库。

3. 根据权利要求 1 所述的车辆外部摄像头清洁方法，其特征在于，所述实时采集当前图像包括：依据环境光照强度对图像执行自适应

应直方图均衡化，再通过时空域联合滤波消除传感器噪声与运动干扰，使当前图像的亮度分布与基准图像保持统计一致性。

4. 根据权利要求 1 所述的车辆外部摄像头清洁方法，其特征在于，所述对遮挡区域进行特征提取包括：生成当前图像与基准图像的差分图，采用多尺度形态学分割提取污染区域边界，结合纹理特征与光谱反射率差异识别污染类型，并统计遮挡覆盖率与空间分布计算遮挡严重程度。

5. 根据权利要求 1 所述的车辆外部摄像头清洁方法，其特征在于，生成所述位移指令包括：在连续式透明保护膜上定位未被污染的洁净区域，计算覆盖光学窗口所需的位移矢量，依据污染类型设定速度曲线，并综合位移距离、速度变化率及执行机构效率选择能耗最低的位移路径。

6. 根据权利要求 1 所述的车辆外部摄像头清洁方法，其特征在于，所述控制执行机构按照所述位移指令驱动连续式透明保护膜单向位移包括：对执行机构施加预设扭矩进行预加载以消除机械间隙，基于编码器反馈实时跟踪速度曲线，动态维持膜面张力以剥离污染物并避免膜面抖动。

7. 根据权利要求 1 所述的车辆外部摄像头清洁方法，其特征在于，所述通过镜头安装界面的导流与边缘密封结构将液态污染物导向并排出膜后间隙包括：依据污染类型预测液态污染物流量，微调位移速度使污染物有序汇入导流槽，并利用膜后间隙气流扰动辅助排空残留液体。

8. 根据权利要求 1 所述的车辆外部摄像头清洁方法，其特征在于，所述重新采集图像，评估图像质量是否恢复至基准水平包括：在位移稳定后采集多帧图像，计算清洁后图像质量得分与基准图像的残差，结合残留污染面积量化清洁成功率指数。

9. 根据权利要求 1 所述的车辆外部摄像头清洁方法，其特征在于，所述若未恢复则触发补偿清洁策略包括：若清洁成功率指数未达阈值，则执行小幅度往复位移以增强刮扫效果；同步监测执行机构电流变化，若检测到周期性阻力异常则启动反向微动解除卡滞。

10. 一种用于实现如权利要求 1-9 任意一项所述方法的车辆外部摄像头清洁系统，其特征在于，包括：

基准图像建立模块，用于建立覆盖于摄像头光学窗口外侧的连续式透明保护膜处于洁净状态时的基准图像；

图像对比模块，用于实时采集当前图像，将所述当前图像与所述基准图像进行比对，基于图像质量退化程度判定光学窗口是否被泥浆、雨水、虫体或污渍遮挡；

执行模块，用于在判定被遮挡时，对遮挡区域进行特征提取，识别污染类型并计算遮挡严重程度，根据所述污染类型和遮挡严重程度生成连续式透明保护膜的位移指令，所述位移指令包含位移方向、位移距离及速度曲线；

清理模块，用于控制执行机构按照所述位移指令驱动连续式透明保护膜单向位移，使洁净膜区替代受污染区域，在连续式透明保护膜位移过程中，通过镜头安装界面的导流与边缘密封结构将液态污染物

导向并排出膜后间隙；

评估模块，用于在位移完成后重新采集图像，评估图像质量是否恢复至基准水平，若未恢复则触发补偿清洁策略。

## 一种车辆外部摄像头清洁系统及方法

### 技术领域

本发明涉及摄像头清洁技术领域，具体是涉及一种车辆外部摄像头清洁系统及方法。

### 背景技术

车辆外部摄像头在行驶中易受泥浆、雨水、虫体及污渍遮挡，导致成像质量下降。现有清洁方案多依赖高压气吹、液体喷淋或机械雨刮，不仅需携带储液罐或气源增加车身负担，还存在低温冻结、介质消耗及划伤光学窗口等隐患。更为关键的是，现有技术缺乏对污染类型和程度的实时感知能力，常采用定时或手动触发模式，无法针对局部顽固污渍进行精准清除，且单一的运动模式难以兼顾不同污染物的物理特性，导致清洁效率低下甚至将污渍涂抹均匀。

此外，现有装置在清除液态污染物时，往往忽视与镜头周边结构的协同配合，容易导致清洗液或雨水在密封间隙处积聚。这种积液现象不仅会形成残留水痕引发二次光学畸变，长期浸泡还可能破坏密封结构的有效性。由于缺乏基于图像反馈的闭环验证机制，系统无法在清洁失败时自动调整策略，难以满足自动驾驶系统对视觉传感器长期自主、可靠运行的严苛要求。

### 发明内容

本发明旨在提供一种车辆外部摄像头清洁系统及方法，确保了在各种复杂工况下成像通路的快速恢复与长期稳定，显著提升了系统的自主运行能力和可靠性。

为达到以上目的，本发明采用的技术方案为：一种车辆外部摄像头清洁方法，包括：

## 说明书

---

建立覆盖于摄像头光学窗口外侧的连续式透明保护膜处于洁净状态时的基准图像；

实时采集当前图像，将所述当前图像与所述基准图像进行比对，基于图像质量退化程度判定光学窗口是否被泥浆、雨水、虫体或污渍遮挡；

若判定被遮挡，则对遮挡区域进行特征提取，识别污染类型并计算遮挡严重程度，根据所述污染类型和遮挡严重程度生成连续式透明保护膜的位移指令，所述位移指令包含位移方向、位移距离及速度曲线；

控制执行机构按照所述位移指令驱动连续式透明保护膜单向位移，使洁净膜区替代受污染区域；

在连续式透明保护膜位移过程中，通过镜头安装界面的导流与边缘密封结构将液态污染物导向并排出膜后间隙；

位移完成后重新采集图像，评估图像质量是否恢复至基准水平，若未恢复则触发补偿清洁策略。

优选的，建立所述基准图像包括：校准连续式透明保护膜的初始位置，采集多帧洁净状态图像进行平均处理，提取图像的平均梯度值、局部对比度分布及色度饱和度均值构建基准特征向量库。

优选的，所述实时采集当前图像包括：依据环境光照强度对图像执行自适应直方图均衡化，再通过时空域联合滤波消除传感器噪声与运动干扰，使当前图像的亮度分布与基准图像保持统计一致性。

优选的，所述对遮挡区域进行特征提取包括：生成当前图像与基

准图像的差分图，采用多尺度形态学分割提取污染区域边界，结合纹理特征与光谱反射率差异识别污染类型，并统计遮挡覆盖率与空间分布计算遮挡严重程度。

优选的，生成所述位移指令包括：在连续式透明保护膜上定位未被污染的洁净区域，计算覆盖光学窗口所需的位移矢量，依据污染类型设定速度曲线，并综合位移距离、速度变化率及执行机构效率选择能耗最低的位移路径。

优选的，所述控制执行机构按照所述位移指令驱动连续式透明保护膜单向位移包括：对执行机构施加预设扭矩进行预加载以消除机械间隙，基于编码器反馈实时跟踪速度曲线，动态维持膜面张力以剥离污染物并避免膜面抖动。

优选的，所述通过镜头安装界面的导流与边缘密封结构将液态污染物导向并排出膜后间隙包括：依据污染类型预测液态污染物流量，微调位移速度使污染物有序汇入导流槽，并利用膜后间隙气流扰动辅助排空残留液体。

优选的，所述重新采集图像，评估图像质量是否恢复至基准水平包括：在位移稳定后采集多帧图像，计算清洁后图像质量得分与基准图像的残差，结合残留污染面积量化清洁成功率指数。

优选的，所述若未恢复则触发补偿清洁策略包括：若清洁成功率指数未达阈值，则执行小幅度往复位移以增强刮扫效果；同步监测执行机构电流变化，若检测到周期性阻力异常则启动反向微动解除卡滞。

另一方面，本发明提出一种车辆外部摄像头清洁系统，包括：

基准图像建立模块，用于建立覆盖于摄像头光学窗口外侧的连续式透明保护膜处于洁净状态时的基准图像；

图像对比模块，用于实时采集当前图像，将所述当前图像与所述基准图像进行比对，基于图像质量退化程度判定光学窗口是否被泥浆、雨水、虫体或污渍遮挡；

执行模块，用于在判定被遮挡时，对遮挡区域进行特征提取，识别污染类型并计算遮挡严重程度，根据所述污染类型和遮挡严重程度生成连续式透明保护膜的位移指令，所述位移指令包含位移方向、位移距离及速度曲线；

清理模块，用于控制执行机构按照所述位移指令驱动连续式透明保护膜单向位移，使洁净膜区替代受污染区域，在连续式透明保护膜位移过程中，通过镜头安装界面的导流与边缘密封结构将液态污染物导向并排出膜后间隙；

评估模块，用于在位移完成后重新采集图像，评估图像质量是否恢复至基准水平，若未恢复则触发补偿清洁策略。

与现有技术相比，本发明的有益效果在于：

本发明通过建立基准图像并实时比对，精准识别污染类型与严重程度，驱动连续式透明保护膜按规划的速度曲线单向位移，以洁净膜区直接替代受污染区域，实现了无需外部介质的自适应精准清洁；同时，位移动作与导流及边缘密封结构协同，将液态污染物有序排出膜后间隙，消除了积液隐患；配合位移后的图像复评与补偿策略，确保

了在各种复杂工况下成像通路的快速恢复与长期稳定，显著提升了系统的自主运行能力和可靠性。

### 附图说明

图 1 为本发明车辆外部摄像头清洁方法的流程图；

图 2 为本发明车辆外部摄像头清洁系统的框图。

### 具体实施方式

以下描述用于揭露本发明以使本领域技术人员能够实现本发明。以下描述中的优选实施例只作为举例，本领域技术人员可以想到其他显而易见的变型。

如图 1 所示，本发明提出一种车辆外部摄像头清洁方法，通过建立基准图像并实时比对，精准识别污染类型与严重程度，驱动连续式透明保护膜按规划的速度曲线单向位移，以洁净膜区直接替代受污染区域，实现了无需外部介质的自适应精准清洁，具体包括：

建立覆盖于摄像头光学窗口外侧的连续式透明保护膜处于洁净状态时的基准图像；具体包括：校准连续式透明保护膜的初始位置，采集多帧洁净状态图像进行平均处理，提取图像的平均梯度值、局部对比度分布及色度饱和度均值构建基准特征向量库。

通过多帧平均处理有效抑制了传感器随机噪声，确保基准数据的纯净度；提取的平均梯度值、局部对比度分布及色度饱和度均值构建了多维度的基准特征向量库，能够全面表征洁净状态下的纹理细节与色彩特性。这不仅为后续污染判定提供了高精度的量化标尺，显著提升了系统对轻微污渍及低对比度污染的识别灵敏度，还有效避免了因

单帧图像波动导致的误判，增强了清洁触发的可靠性。

实时采集当前图像，将所述当前图像与所述基准图像进行比对，基于图像质量退化程度判定光学窗口是否被泥浆、雨水、虫体或污渍遮挡；实时采集当前图像包括：依据环境光照强度对图像执行自适应直方图均衡化，再通过时空域联合滤波消除传感器噪声与运动干扰，使当前图像的亮度分布与基准图像保持统计一致性。

通过自适应直方图均衡化消除了环境光照剧烈变化对成像的影响，确保图像亮度分布的稳定性；结合时空域联合滤波有效剔除了传感器噪声与车辆运动产生的动态干扰，使当前图像与基准图像在统计特性上保持高度一致。这种预处理机制显著提升了图像比对的可信度，避免了因光照突变或车身抖动引发的虚假污染报警，确保了遮挡判定的实时性与准确性。

若判定被遮挡，则对遮挡区域进行特征提取，识别污染类型并计算遮挡严重程度，根据所述污染类型和遮挡严重程度生成连续式透明保护膜的位置指令，所述位置指令包含位移方向、位移距离及速度曲线；

其中，对遮挡区域进行特征提取包括：生成当前图像与基准图像的差分图，采用多尺度形态学分割提取污染区域边界，结合纹理特征与光谱反射率差异识别污染类型，并统计遮挡覆盖率与空间分布计算遮挡严重程度。

进一步的，生成位置指令包括：在连续式透明保护膜上定位未被污染的洁净区域，计算覆盖光学窗口所需的位移矢量，依据污染类型

设定速度曲线，并综合位移距离、速度变化率及执行机构效率选择能耗最低的位移路径。

通过多尺度形态学分割与光谱纹理分析，实现了对不同污染物（如泥浆、虫体）的精准分类与严重程度量化，为清洁策略提供了精细化的决策依据。基于此生成的位移指令能够智能规划最优路径与速度曲线，在确保洁净膜区完全覆盖遮挡区域的同时，显著降低了执行机构的能耗与机械磨损；针对顽固污渍定制的变速驱动策略，有效提升了单次位移的清洁效率，避免了因盲目运动导致的清洁不彻底或资源浪费。

控制执行机构按照所述位移指令驱动连续式透明保护膜单向位移，使洁净膜区替代受污染区域；具体包括：对执行机构施加预设扭矩进行预加载以消除机械间隙，基于编码器反馈实时跟踪速度曲线，动态维持膜面张力以剥离污染物并避免膜面抖动。

通过预加载扭矩消除机械间隙，确保了位移起始阶段的零延迟与高精度响应；结合编码器反馈的闭环控制与动态张力维持技术，不仅实现了速度曲线的精准跟踪，还利用膜面张力产生的剪切力有效剥离附着污染物。该机制彻底避免了传统机械传动中的抖动与卡顿现象，在保障保护膜平稳、无褶皱切换的同时，显著提升了单次清洁的彻底性与光学成像的恢复质量。

在连续式透明保护膜位移过程中，通过镜头安装界面的导流与边缘密封结构将液态污染物导向并排出膜后间隙；具体包括：依据污染类型预测液态污染物流量，微调位移速度使污染物有序汇入导流槽，

并利用膜后间隙气流扰动辅助排空残留液体。

利用导流与边缘密封结构构建了高效的液态污染物排出通道，结合基于流量预测的速度微调策略，实现了污染物向导流槽的有序汇入，有效防止了液体在膜后间隙的无序扩散或回流。配合气流扰动辅助排空机制，显著提升了残留液体的清除效率，避免了水渍残留对成像质量的二次干扰，确保了光学窗口在复杂液态污染环境下快速恢复高透光度。

位移完成后重新采集图像，评估图像质量是否恢复至基准水平，若未恢复则触发补偿清洁策略；

其中，重新采集图像具体包括：在位移稳定后采集多帧图像，计算清洁后图像质量得分与基准图像的残差，结合残留污染面积量化清洁成功率指数。

进一步的，若未恢复则触发补偿清洁策略包括：若清洁成功率指数未达阈值，则执行小幅度往复位移以增强刮扫效果；同步监测执行机构电流变化，若检测到周期性阻力异常则启动反向微动解除卡滞。

通过多帧图像残差分析与清洁成功率指数量化，实现了对清洁效果的精准闭环评估，避免了单次采样的偶然误差。基于评估结果触发的补偿策略具备高度自适应能力：小幅度往复位移针对性地增强了顽固污渍的刮扫剥离效果，而基于电流监测的反向微动机制则能即时识别并解除机械卡滞。这种智能反馈机制显著提升了系统在极端污染或机械异常下的鲁棒性，确保光学窗口最终能稳定恢复至基准成像水平，保障了感知系统的持续可靠运行。

另一方面，本发明提出一种车辆外部摄像头清洁系统，如图 2 所示，包括：

基准图像建立模块，用于建立覆盖于摄像头光学窗口外侧的连续式透明保护膜处于洁净状态时的基准图像；

图像对比模块，用于实时采集当前图像，将所述当前图像与所述基准图像进行比对，基于图像质量退化程度判定光学窗口是否被泥浆、雨水、虫体或污渍遮挡；

执行模块，用于在判定被遮挡时，对遮挡区域进行特征提取，识别污染类型并计算遮挡严重程度，根据所述污染类型和遮挡严重程度生成连续式透明保护膜的位移指令，所述位移指令包含位移方向、位移距离及速度曲线；

清理模块，用于控制执行机构按照所述位移指令驱动连续式透明保护膜单向位移，使洁净膜区替代受污染区域，在连续式透明保护膜位移过程中，通过镜头安装界面的导流与边缘密封结构将液态污染物导向并排出膜后间隙；

评估模块，用于在位移完成后重新采集图像，评估图像质量是否恢复至基准水平，若未恢复则触发补偿清洁策略。

此外，上述各模块在执行时还用于实现上述的一种车辆外部摄像头清洁方法的其他步骤，如下：

步骤一：系统初始化与环境基准建立

系统上电启动后，首要任务是完成硬件状态的自检与光学环境基准的建立，为后续污染识别提供参照标准。

### 步骤 1.1: 硬件组件状态自检与零点校准

在系统接收到启动指令后, 首先向覆盖于摄像头光学窗口外侧的连续式透明保护膜驱动机构发送握手信号, 确认电机、传动齿轮及张力传感器的电气连接正常。随后, 执行机构带动保护膜进行微幅的往复运动, 以消除机械间隙带来的定位误差, 并将保护膜的起始边缘对齐至镜头安装界面的预设刻度线, 该刻度线位于集成于镜头安装界面的导流与边缘密封结构的内侧安全区。

在此过程中, 张力传感器实时反馈保护膜的张紧力数据, 确保膜面处于平整且无褶皱的初始状态, 避免因膜面松弛导致的光学畸变被误判为污染。只有当所有硬件组件反馈的状态值均落在预设的安全阈值区间内, 系统才判定自检通过, 进入下一阶段的基准采集; 若检测到张力异常或位移受阻, 系统将暂停运行并记录故障代码, 防止在机械状态不佳的情况下强行运作导致保护膜撕裂或密封失效。

### 步骤 1.2: 洁净光学通路参考帧采集

基于确认的硬件就绪状态, 摄像头传感器在保护膜处于全新洁净区域覆盖光学窗口时, 立即采集一组高分辨率的静态图像序列。此时, 车辆通常处于出厂设置后的首次运行或刚刚完成一次成功的自清洁循环, 光学窗口表面无任何泥浆、雨水或虫体遮挡。将这组图像序列进行多帧平均处理, 消除传感器固有的随机噪声, 生成一张代表当前光照条件下理想洁净状态的参考帧。这张参考帧不仅记录了场景的纹理细节, 还包含了镜头本身的光学特性, 如渐晕效应和色彩偏差, 这些固有特征将在后续的步骤中被视为正常背景而非污染干扰。参考帧

被存储在高速缓存区中，作为后续所有实时图像比对的基础模板，其有效性直接决定了污染判定的准确度，因此必须确保采集时保护膜区域绝对洁净且位置固定。

### 步骤 1.3: 环境光照强度分级与动态范围映射

分析当前环境的光照强度分布，以建立动态范围映射关系。由于车辆行驶环境光照变化剧烈，从隧道内的昏暗到阳光直射的高亮，单一的固定阈值无法适应所有场景。系统利用参考帧中的直方图统计信息，将环境光照划分为多个等级，并为每个等级设定对应的图像增益系数和曝光时间基准。这一过程确保了在不同亮度环境下，系统对图像质量退化的敏感度保持一致，避免在低光环境下因噪点增加而误报污染，或在高光环境下因过曝而漏检浅色污渍。光照等级的划分结果将作为后续图像预处理的重要参数，指导实时图像进行标准化的亮度归一化处理，使得不同时间段采集的图像具有可比性，从而为基于图像质量退化感知的污染识别奠定坚实的数据基础。

### 步骤 1.4: 基准特征向量库构建与存储

结合光照等级参数，从参考帧中提取关键的特征向量，构建初始的基准特征向量库。这些特征向量包括图像的平均梯度值、局部对比度分布、色度饱和度均值以及高频纹理能量的统计量。为了量化这些特征，系统引入一个基准综合评分公式，用于表征当前洁净状态下的图像质量水平：

$$Q_{base} = \alpha \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\nabla I_{ref}(i)| + \beta \cdot \sigma_{local}(I_{ref}) + \gamma \cdot \bar{S}_{chroma} ;$$

其中， $Q_{base}$  表示基准综合评分， $N$  为图像像素总数， $\nabla I_{ref}(i)$  代表参考帧在第  $i$  个像素点的梯度幅值，反映图像的清晰度和边缘锐利度； $\sigma_{local}(I_{ref})$  表示参考帧局部窗口的对比度标准差，体现纹理丰富程度； $\bar{S}_{chroma}$  为图像色度饱和度的平均值； $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为各分项的权重系数，且满足  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ，其数值根据摄像头的光学特性和典型行驶场景预先标定。该公式计算出的  $Q_{base}$  值被存入基准特征向量库，作为后续步骤中判断图像质量是否发生退化的绝对标尺。任何实时采集的图像都将通过与该基准值的偏离程度来评估其受污染的可能性，从而启动了整个基于图像质量退化感知的防护闭环。

### 步骤二：实时图像流采集与预处理

在完成了系统初始化与环境基准建立后，系统进入持续运行的监测阶段。此阶段的核心任务是实时获取摄像头捕捉的视频流，并对其进行必要的预处理，以消除环境光照波动和传感器噪声的干扰，提取出能够真实反映光学窗口表面状态的图像数据。预处理后的图像将直接用于与步骤一中建立的基准特征进行比对，是发现有效遮挡迹象的第一道防线。

#### 步骤 2.1：连续视频流同步捕获与帧缓冲

依据步骤一中确立的基准特征向量库，摄像头传感器开始以设定的帧率连续捕获外部场景的视频流。通过高速总线接口同步接收这些图像数据，并将其写入环形帧缓冲区。为了保证实时性，缓冲区采用双缓冲机制，当一帧图像在分析时，下一帧图像同时写入备用缓冲区，确保数据流不中断。每一帧进入缓冲区的图像都附带了精确的时间戳

和当前的光照等级标签, 这些标签直接引用自步骤一步骤 1.3 中定义的光照分级标准。这种同步捕获机制确保了后续分析的数据具有时间连续性和环境一致性, 使得系统能够捕捉到污染物附着的瞬间变化, 而不是仅仅关注静态的图像状态, 为实时识别光学窗口因泥浆、雨水、虫体或污渍导致的有效遮挡提供了源源不断的数据源。

### 步骤 2.2: 基于光照等级的自适应直方图均衡化

针对步骤 2.1 中捕获并带有光照等级标签的实时图像帧, 调用步骤一中对应光照等级的增益系数, 执行自适应直方图均衡化处理。由于车辆行驶过程中光照条件瞬息万变, 直接使用原始图像进行对比会因亮度差异产生巨大的误差。该处理过程将图像的灰度分布拉伸至全动态范围, 增强局部对比度, 使得隐藏在暗部或亮部的微弱污渍纹理得以显现。在处理过程中, 系统严格限制过度增强, 防止将传感器噪声放大为虚假的污染特征。经过均衡化后的图像, 其亮度分布与步骤一生成的参考帧在统计特性上趋于一致, 消除了因环境光变化引起的整体亮度偏移, 使得后续的差分运算能够专注于图像内容的结构性变化, 即由污染物引起的光学通路阻断, 而非光照强度的自然波动。

### 步骤 2.3: 时空域联合滤波去噪

在完成亮度归一化的基础上, 对图像进行时空域联合滤波, 以进一步抑制随机噪声并保留真实的边缘细节。由于单一的空间滤波可能会模糊细小的污渍边界, 而单纯的时间滤波在场景快速运动时会产生拖影, 因此本步骤采用一种结合邻域空间信息和前后帧时间信息的混合滤波方法。滤波器利用步骤一中记录的传感器噪声模型, 动态调整

滤波核的大小和权重。对于静止或慢速变化的背景区域，加大时间域的加权比例，利用多帧平均消除噪声；对于快速运动的物体边缘，则主要依赖空间域的导向滤波，保持边缘锐利。这一过程有效剔除了图像中的高频随机干扰，确保保留下来的低频和中频信号主要来源于场景结构和可能附着在光学窗口上的污染物，为下一步的特征提取提供了高信噪比的纯净数据。

### 步骤 2.4：实时图像质量初步量化评估

经过滤波处理后的清晰图像，将被送入质量评估单元进行初步量化。此环节直接引用步骤一 1.4 中构建的基准特征向量库，计算当前帧的各项特征指标，并代入修正后的质量评分公式，得出实时的图像质量得分。为了适应实时性的要求，该公式在基准公式的基础上引入了时间平滑因子，以防止单帧抖动导致的误判：

$$Q_{real}(t) = \lambda \cdot (\alpha \cdot |\overline{\nabla I_t}| + \beta \cdot \sigma_{local}(I_t) + \gamma \cdot \bar{S}_t) + (1 - \lambda) \cdot Q_{real}(t - 1)$$

其中， $Q_{real}(t)$  表示当前时刻  $t$  的实时图像质量得分， $I_t$  为当前处理后的图像帧， $|\overline{\nabla I_t}|$ 、 $\sigma_{local}(I_t)$ 、 $\bar{S}_t$  分别对应当前帧的梯度均值、局部对比度标准差和色度饱和度均值，参数  $\alpha, \beta, \gamma$  沿用步骤一 1.4 定义的权重； $\lambda$  为时间平滑系数 ( $0 < \lambda < 1$ )，用于平衡当前帧信息与历史状态的影响， $Q_{real}(t - 1)$  为上一时刻的质量得分。通过该公式计算出的  $Q_{real}(t)$  值，直观地反映了当前光学通路的通畅程度。若该值显著低于步骤一中存储的  $Q_{base}$  基准值，则暗示光学窗口可能受到了某种形式的遮挡，这一初步评估结果将作为触发后续深度污染判定的直接依据，推动流程进入更细致的分析阶段。

### 步骤三：污染特征深度解析与类型甄别

当步骤二的实时图像质量初步量化评估显示得分出现异常下降时，系统即刻转入深度解析模式。此步骤不再局限于整体的质量评分，而是深入图像的局部区域，通过复杂的特征比对和形态学分析，精准定位污染物的具体位置，并甄别其类型是液态的雨水、粘稠的泥浆、固体的虫体还是普通的灰尘污渍。

#### 步骤 3.1：基于差分图的异常区域粗定位

依据实时质量得分  $Q_{real}(t)$  与基准值  $Q_{base}$  的差值，一旦差值超过预设的警戒阈值，立即启动差分分析。系统将当前预处理后的图像帧与步骤一生成的参考帧进行像素级的减法运算，生成一幅差分图。在这幅差分图中，场景中没有变化的部分（如道路、建筑）因亮度一致而被抵消，呈现为黑色背景；而光学窗口上新增的污染物由于阻挡或折射光线，导致像素值发生显著变化，从而在差分图中形成高亮区域。为了排除车辆运动带来的视差影响，系统在差分前利用光流法对参考帧进行几何变换，使其与当前帧的场景内容对齐。经过对齐和差分处理后，所有非零像素区域即被标记为潜在的异常区域，这些区域的坐标集合构成了污染物的粗略轮廓，为后续的精细化分割提供了感兴趣区域（ROI），确保计算资源集中分布在真正发生退化的部位。

#### 步骤 3.2：多尺度形态学分割与边界提取

在确定的潜在异常区域内，运用多尺度形态学算子进行进一步的分割与边界提取。由于泥浆、虫体和雨滴在尺寸和形状上存在巨大差异，单一尺度的算子无法同时有效提取所有特征。系统采用一组不同

半径的结构元素，对差分图中的高亮区域进行开运算和闭运算处理。小半径结构元素用于去除孤立的噪点，大半径结构元素用于连接断裂的污渍边缘，特别是对于被雨水冲刷成条状的泥痕或分散的虫尸残骸，这种方法能有效将其整合为完整的连通域。随后，系统提取每个连通域的闭合边界，并计算其面积、周长、紧凑度等几何属性。这些几何属性将与预设的污染物特征库进行匹配，例如，高紧凑度且面积较小的区域可能被判定为虫体，而长宽比极大且边缘不规则的区域则倾向于泥浆或水流痕迹。分割后的独立污染块及其几何描述符，成为了判断污染类型和严重程度的核心数据。

### 步骤 3.3: 纹理与光谱特征融合的类型判别

基于提取的污染块几何边界，进一步深入分析每个污染块内部的纹理和光谱特征，以实现精准的类型判别。系统截取原图中对应边界内的图像补丁，计算其灰度共生矩阵 (GLCM) 以获取能量、熵、相关性等纹理指标，同时分析其在红、绿、蓝三个通道的光谱反射率差异。例如，雨水通常表现为高透光性且纹理平滑，泥浆则表现为低透光性、高粗糙度且光谱反射率较低，虫体往往具有特定的颜色特征和不规则的凹凸纹理。为了量化这种判别过程，系统构建了一个类型判别置信度公式：

$$C_{type} = \max_{k \in \{rain, mud, bug, dust\}} \left( \frac{1}{D_{texture}(F_{tex}, F_{tex}^k) + D_{spectral}(F_{spec}, F_{spec}^k)} \right)$$

其中， $C_{type}$  表示当前污染块属于某一类型的最大置信度， $k$  遍历所有预定义的污染类型集合（雨水、泥浆、虫体、灰尘）； $F_{tex}$  和

$F_{spec}$  分别为当前污染块实测的纹理特征向量和光谱特征向量,  $F_{tex}^k$  和  $F_{spec}^k$  为类型 k 的标准特征模板;  $D_{texture}$  和  $D_{spectral}$  分别表示实测特征与标准模板在纹理空间和光谱空间的欧氏距离。该公式通过计算特征距离的倒数来确定最匹配的污染类型, 距离越小, 置信度越高。

### 步骤 3.4: 遮挡严重程度分级与覆盖面积统计

综合污染类型判别结果及其空间分布, 对遮挡的严重程度进行分级, 并统计有效遮挡面积。系统将整个光学窗口划分为若干个网格, 统计被判定为污染区域的网格数量占总网格数的比例, 得到遮挡覆盖率。同时, 结合污染类型, 对不同区域的遮挡权重进行加权, 例如, 位于图像中心的泥浆遮挡对成像的影响远大于边缘的少量灰尘, 因此中心区域的权重系数更高。基于覆盖率和加权分布, 系统生成一个综合的严重程度指数。如果指数较低, 表明仅为轻微污渍, 可能不需要立即动作或仅需小幅位移; 若指数较高, 特别是当中心视野被高置信度的泥浆或虫体大面积覆盖时, 系统判定为严重遮挡, 必须立即触发高强度的清洁动作。这一分级结果直接决定了下一步骤中清洁决策的具体参数, 如位移的距离、速度以及是否需要配合导流结构进行多次冲刷, 确保应对措施与污染现状高度匹配。

### 步骤四: 清洁决策生成与位移参数规划

在完成了对污染特征的深度解析与类型甄别后, 系统进入了决策规划阶段。此步骤的核心任务是根据步骤三输出的污染类型、位置分布及严重程度, 制定具体的保护膜位移方案。

### 步骤 4.1: 目标洁净区域映射与位移矢量计算

依据遮挡严重程度及污染区域边界坐标，首先在连续式透明保护膜的展开长度方向上，搜索未被污染的洁净区域。系统将保护膜的总长度划分为若干逻辑段，每段的状态（洁净、轻度污染、重度污染）实时更新。一旦锁定当前的受污染区域，算法立即在邻近的上游或下游寻找一段长度足以完全覆盖当前光学窗口且状态为“洁净”的膜区。确定目标洁净区后，系统计算从当前位置到目标位置的位移矢量，包括位移的方向（单向向前或向后）和位移的距离。位移距离的计算不仅要覆盖当前的污染区，还需预留一定的安全余量，防止因机械误差导致新的污染边缘恰好落在光学窗口的可视范围内。该矢量的计算结果直接引用了步骤三中确定的污染块几何中心，确保位移的终点能使洁净区的中心与镜头光轴重合，实现最优的成像效果。

### 步骤 4.2：基于污染粘附特性的速度曲线规划

在确定了位移矢量的基础上，进一步结合步骤 3.3 判别的污染类型，规划执行机构的运动速度曲线。不同类型的污染物对保护膜的粘附力不同，移除它们所需的剪切力也各异。对于松散的灰尘或雨水，可以采用较高的速度和较短的加速时间，以快速完成清洁；而对于粘稠的泥浆或干结的虫体，则需要较低的匀速段速度和较长的加减速过程，以确保持续的剪切力能有效剥离污渍，同时避免因速度突变导致保护膜抖动或撕裂。系统采用分段多项式插值方法生成平滑的速度-时间曲线，确保加速度连续，减少机械冲击。

### 步骤 4.3：能耗优化与最小位移路径选择

考虑到车辆电气系统的负载限制及长期运行的可靠性，步骤 4.2

生成的初步速度曲线还需经过能耗优化的筛选。在多个可行的洁净区域候选方案中（例如向前位移 5 厘米或向后位移 8 厘米均可达到清洁目的），选择能耗最低的路径。为此，系统引入一个能耗代价函数，综合考量位移距离、速度变化率以及执行机构的效率特性：

$$E_{cost} = \int_0^T (k_1 \cdot v(t)^2 + k_2 \cdot |a(t)| + k_3 \cdot L_{move}) dt$$

其中， $E_{cost}$  表示本次清洁动作的预估能耗代价， $T$  为动作持续时间， $v(t)$  和  $a(t)$  分别为时刻  $t$  的瞬时速度和加速度， $L_{move}$  为总位移距离； $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为与电机特性及机械传动效率相关的加权系数。该公式通过对速度平方项（代表风阻和摩擦损耗）、加速度绝对值项（代表惯性负载）以及位移距离项的积分，量化了不同运动方案的能量消耗。系统通过比较不同候选路径的  $E_{cost}$  值，选择数值最小的方案作为最终执行指令。

#### 步骤 4.4：导流协同预演与积液风险预判

在最终下达位移指令前，还需进行最后一步的协同预演，即评估位移动作与集成于镜头安装界面的导流与边缘密封结构的配合效果。根据步骤 3.3 识别的液态污染物（如雨水、泥浆水）含量，系统预测在保护膜移动过程中，液态污染物被刮带至边缘密封结构处的流量和流速。如果预测到短时间内会有大量液体涌入导流槽，系统会微调位移速度，使其与导流结构的排水能力相匹配，防止因液体堆积过快而溢出密封区，引发积液导致的光学畸变或密封失效。这一预判过程模拟了流体在膜后间隙的运动趋势，确保位移动作不仅能带走固体污渍，还能利用保护膜的刮扫作用，将液态污染物有序地引导至被动导

流结构排出口。只有当预判结果显示积液风险在可控范围内，系统才会正式生成包含位移距离、速度曲线及协同模式的完整清洁指令，准备下发给执行机构，从而开启物理清洁的实际动作，实现从感知决策到执行控制的无缝衔接。

### 步骤五：执行机构驱动与保护膜定向位移实施

在步骤四完成了清洁决策生成与位移参数规划后，系统正式进入物理执行阶段。此步骤的核心在于将计算出的数字化指令转化为机械动作，驱动覆盖于摄像头光学窗口外侧的连续式透明保护膜进行单向或双向的定向位移。这一过程遵循步骤四中规划的速度曲线和位移距离，确保洁净膜区能够准确、平稳地替代受污染区域。同时，执行机构的动作需与镜头周边的被动导流结构产生动态配合，利用保护膜的移动产生的剪切力剥离污渍，并将液态污染物推向指定的导流通道，避免在膜后间隙形成积液。

#### 步骤 5.1：驱动信号生成与电机扭矩预加载

依据最终确认的清洁指令，向驱动该膜单向位移的执行机构发送高精度的脉冲宽度调制（PWM）信号。在电机启动的瞬间，系统并非立即全速运转，而是首先执行扭矩预加载操作。这一步骤引用了步骤 4.2 中规划的加速度曲线初始值，控制电机输出一个略高于静摩擦力但低于最大额定扭矩的保持力矩，以消除传动齿轮间的背隙，并拉紧连续式透明保护膜，使其从松弛状态瞬间进入张紧待命状态。

预加载的扭矩大小直接参考步骤三中判别的污染物粘附特性，若判定为干结泥浆或顽固虫体，预加载扭矩将适当提高，以确保启动瞬

间即能产生足够的剪切力打破污渍与膜面的粘连；若仅为雨水或浮尘，则采用柔和的预加载策略，减少机械磨损。只有当张力传感器反馈的实时张力值达到预设的启动阈值，且电机转子位置编码器确认零点锁定后，系统才正式释放制动，开始执行位移动作，确保起步平稳无冲击。

### 步骤 5.2：基于闭环反馈的速度曲线跟踪

随着执行机构启动，系统进入步骤 5.1 所确定的运动轨迹跟踪阶段。在此过程中，安装在电机轴上的高分辨率编码器实时反馈转子的角速度和角位置，将这些反馈数据与步骤 4.2 中规划的理想速度-时间曲线进行实时比对。系统构建了一个闭环控制回路，不断计算实际速度与目标速度之间的偏差，并动态调整输出给电机的驱动电压，以修正因负载变化（如污渍阻力波动）引起的速度波动。为了确保位移过程的平滑性，控制逻辑严格限制加速度的变化率，防止因速度突变导致保护膜发生高频抖动，进而影响成像稳定性或造成膜面划伤。这一跟踪过程贯穿整个位移行程，确保保护膜在任何时刻的运动状态都符合步骤四中能耗优化与清洁效率平衡的要求，使洁净膜区以最佳的状态扫过光学窗口表面。

### 步骤 5.3：膜面刮扫与污染物剥离动力学作用

在步骤 5.2 保证的平稳运动下，连续式透明保护膜相对于固定的镜头安装界面产生相对滑动，此时膜面与光学窗口表面的污染物发生直接的物理接触与相互作用。对于附着在膜外表面的泥浆、虫体或灰尘，移动的保护膜利用其与污渍之间的摩擦力以及膜面形变产生的微

幅刮扫效应，将污染物从光路中心区域向边缘推移。特别是对于液态污染物，保护膜的运动起到了类似雨刮器的作用，将分散的水珠或泥水汇聚成较大的液流。这一过程的效率取决于步骤 5.1 中设定的张紧力和步骤 5.2 中维持的运动速度，两者共同决定了施加在污染物上的剪切应力大小。系统利用步骤三中识别的污染类型信息，动态调整膜面与窗口表面的接触压力分布，确保在剥离顽固污渍的同时，不会因为压力过大而损伤保护膜涂层或导致膜面永久性拉伸变形。

### 步骤 5.4：液态污染物导向与间隙排空协同

随着污染物剥离过程，被汇聚的液态污染物在保护膜的推动下流向镜头安装界面的边缘。此时，集成于镜头安装界面的导流与边缘密封结构开始发挥作用。保护膜的位移方向经过步骤四的规划，确保将所有液态污染物精确地引导至导流槽的入口处，而非随意堆积在密封圈的死角。在膜移动的过程中，膜后间隙（即保护膜内表面与镜头外罩之间的微小空隙）内的空气随之流动，形成微弱的气压差，辅助将渗入间隙的微量液体挤出。系统通过监测边缘密封结构处的湿度传感器数据，实时评估排空效果。若检测到局部液位上升过快，系统会依据步骤 4.4 的预判逻辑，瞬时微调电机速度，利用膜面的快速扫过产生的离心力或气流扰动，加速液体进入导流通道，确保膜后间隙始终保持干燥，彻底避免积液引发的光学畸变或长期浸泡导致的密封失效，完成了从污染物移除到废液排放的物理闭环。

### 步骤六：位移后即时成像质量复评与验证

当步骤五中的保护膜定向位移实施完毕后，系统不能立即假定清

洁成功，立即进入验证阶段。此步骤旨在通过再次采集和分析图像，量化评估清洁动作的实际效果，确认光学通路是否已恢复至可用状态。这一过程是连接物理执行与后续决策的桥梁，其结果将直接决定系统是结束本次清洁循环、进行二次补偿清洁，还是触发故障报警。

### 步骤 6.1: 位移稳定后的图像重采集

在执行机构停止运动并到达目标位置后，系统并不立即拍照，而是等待一个稳定时间，以消除保护膜停止瞬间可能产生的微小振动。随后，摄像头传感器重新采集一组实时图像帧。这组图像的采集参数（如曝光时间、增益）直接引用步骤一中根据当前环境光照等级设定的基准参数，确保与步骤二中的预处理条件保持一致。采集区域严格限定在光学窗口的有效视场内，重点关注步骤三中识别出的原污染区域及其周边地带。为了排除单帧偶然性，系统连续采集多帧图像并进行初步的时序对齐，确保所获取的图像数据真实反映了位移后静止状态下的光学窗口清晰度，为后续的质量复评提供新鲜且稳定的数据源。

### 步骤 6.2: 清洁前后特征差异对比分析

基于采集的新图像帧，提取其梯度、对比度、色度等特征向量，并将其与步骤五执行前的原始污染图像特征以及步骤一建立的洁净基准特征进行三方对比。系统重点计算新图像特征与洁净基准特征之间的残差，同时分析新图像与原污染图像在异常区域（即步骤 3.1 定位的区域）的像素值变化率。如果新图像在原污染区域的纹理细节显著恢复，且高频能量接近基准水平，则表明清洁有效；反之，若残留

明显的低对比度斑块或模糊边界，则提示清洁不彻底。这一对比分析过程不仅关注整体评分的提升，更侧重于局部区域的改善程度，确保没有遗漏任何细小的污渍残留，特别是那些位于视野边缘或形状不规则的顽固污点，从而对清洁效果做出全面而细致的评判。

### 步骤 6.3: 清洁成功率量化计算

为了给出一个明确的定性结论，系统引入一个清洁成功率量化公式，综合考量图像质量恢复程度和残留污染面积。该公式结合了步骤 6.2 中的特征对比数据，计算出当前的清洁效能指数：

$$\eta_{clean} = \frac{Q_{post} - Q_{pre}}{Q_{base} - Q_{pre}} \times \left(1 - \frac{A_{residual}}{A_{total}}\right);$$

其中， $\eta_{clean}$  表示清洁成功率指数， $Q_{post}$  为位移后新图像的实时质量得分（计算方法同步骤二步骤 2.4）， $Q_{pre}$  为位移前污染图像的质量得分， $Q_{base}$  为步骤一建立的基准综合评分； $A_{residual}$  为新图像中仍被判定为污染区域的残留面积， $A_{total}$  为光学窗口的总有效面积。该公式的第一项反映了图像质量的相对恢复比例，第二项则是对残留污渍面积的惩罚因子。若  $\eta_{clean}$  接近 1，说明图像质量完全恢复且无残留；若数值较低，则表明虽然质量有所提升但仍存在明显遮挡。

### 步骤 6.4: 验证结果分级与后续路径选择

根据计算出的清洁成功率指数  $\eta_{clean}$ ，将验证结果划分为三个等级，并据此选择后续的执行路径。若  $\eta_{clean}$  高于高阈值（例如 0.9），判定为“清洁成功”，系统直接进入步骤八的复位与待机流程；若  $\eta_{clean}$  介于高低阈值之间，判定为“部分清洁”，表明仍有少量顽固污渍或水痕，系统将返回步骤四，规划一次小幅度、高频率的往复位

移策略，尝试进一步清除残留物；若 $\eta_{clean}$  低于低阈值，判定为“清洁失败”，这可能意味着保护膜已耗尽洁净段、执行机构故障或污染物性质超出处理能力，系统将触发故障报警，并锁定当前状态等待人工干预，同时记录详细的故障日志供后续分析。

### 步骤七：异常工况诊断与自适应补偿调节

针对步骤六中判定为“部分清洁”或“清洁失败”的情况，以及运行过程中传感器检测到的异常信号，进行深度的诊断与自适应补偿。此步骤体现了系统的鲁棒性，通过动态调整运行参数或启用备用策略，试图在无人工干预的情况下解决突发问题，最大限度地延长系统的自主运行时间。

#### 步骤 7.1：机械阻力异常检测与卡滞诊断

当系统接收到步骤六发出的“部分清洁”或“清洁失败”信号，或者在步骤五执行过程中监测到电机电流持续超过额定峰值时，立即启动机械阻力异常检测程序。系统分析电机电流波形与转子位置的关系，判断是否存在周期性的阻力突变或持续的堵转现象。如果电流在特定位置反复升高，系统推断该处可能存在硬物卡滞或保护膜折叠；如果电流全程偏高且位移速度无法达标，则可能是保护膜张力过大或导轨润滑失效。诊断逻辑引用步骤五中记录的实时扭矩数据，结合步骤三中的污染类型（如大块干结泥浆可能导致额外阻力），综合判定异常根源。一旦确认为机械卡滞，系统将尝试执行反向微动策略，即控制执行机构进行小幅度的往复震荡，试图松动卡死部位，若多次尝试无效，则判定为硬件故障，转入安全停机模式，防止烧毁电机或撕

裂保护膜。

### 步骤 7.2: 顽固污渍的多轮次复合清洁策略

针对排除机械故障后仍存在的“部分清洁”情况，特别是面对步骤三中识别的高粘附力泥浆或虫体，系统自动切换至多轮次复合清洁模式。此模式不再沿用单次单向位移策略，而是规划一种“前进-后退-再前进”的往复式运动轨迹。系统根据残留污渍的位置，计算最佳的往复振幅和频率，利用保护膜在污渍表面的反复摩擦，逐步削弱污渍的附着力。在这一过程中，系统会动态增加步骤 5.1 中的预加载扭矩，并适当降低移动速度，以增大单位面积上的剪切作用时间。同时，系统会利用步骤五中提到的导流结构，在往复运动中多次冲刷同一区域，利用液流的冲击力辅助剥离污渍。

### 步骤 7.3: 导流效能评估与积液应急排出

在执行复合清洁策略的同时，系统密切关注集成于镜头安装界面的导流与边缘密封结构的工作状态。若步骤五中提到的湿度传感器检测到导流槽内液位异常升高，或有液体溢出迹象，系统立即启动积液应急排出程序。此时，暂时暂停保护膜的清洁位移，转而控制执行机构进行快速的短行程扫掠，利用膜面高速运动产生的风压和离心力，强行将积聚在边缘的液体甩入导流口。系统还会结合车辆行驶速度信息（若可用），在车辆高速行驶时利用自然风压辅助排水，或在静止状态下通过高频振动模式促进液体流动。这一应急措施优先于清洁任务，因为积液导致的光学畸变或短路风险远大于污渍遮挡。只有在确认液位恢复正常、导流通道畅通后，系统才会恢复正常的清洁流程，

确保整个防护体系在极端天气下依然稳固可靠。

### 步骤 7.4: 保护膜余量监测与耗尽预警

考虑到连续式透明保护膜的总长度是有限的，系统在每次位移后都会更新保护膜的剩余可用长度计数器。在步骤七的诊断过程中，系统特别检查当前洁净膜区的余量是否足以支持后续清洁需求。如果计数器显示剩余洁净长度低于预设的安全阈值，或者步骤六的验证结果显示即使经过多轮次复合清洁仍无法恢复图像质量（暗示可能已使用到受损或脏污的膜段），系统将触发耗尽预警。此时，系统不再尝试新的清洁动作，而是通过车载网络向驾驶员或中央控制单元发送更换提示，并记录最后一次有效清洁的位置信息，以便维护人员快速定位和处理。这一功能确保了系统不会在无效的状态下空转，同时也为长期的维护保养提供了准确的数据支持，实现了从自主运行到人工维护的平滑过渡。

### 步骤八: 系统复位、状态归档与长效待机管理

将整个系统恢复到最佳的待机状态，归档本次运行的所有关键数据，并为下一次潜在的污染事件做好准备。这一过程不仅是单次清洁循环的终点，更是下一个循环的起点，确保了系统能够长期、稳定、自主地运行。

#### 步骤 8.1: 执行机构归位与保护膜张力松弛保护

依据步骤五至七的最终执行结果，若系统判定当前光学窗口已处于洁净可用状态，将控制执行机构将保护膜调整至一个最优的“待机位置”。这个位置通常选择在刚刚使用过的洁净区域的末端，预留出

一段足够应对常见轻度污染的冗余长度，同时避开可能存在的褶皱或应力集中点。在到达指定位置后，系统并不会一直保持高张紧状态，而是适度降低电机的保持扭矩，使保护膜处于一种“微张紧”的松弛保护状态。这种状态既能防止膜面因长期过度拉伸而发生塑性变形或老化开裂，又能保证在下次需要快速响应时能迅速建立工作张力。

### 步骤 8.2：运行数据日志归档与特征库更新

在机械归位的同时，将本次清洁循环的全过程数据进行整理和归档。这些数据包括步骤三的污染类型统计、步骤四的决策参数、步骤五的执行曲线、步骤六的验证结果以及步骤七的异常处理记录。系统将这些数据打包写入非易失性存储器，形成历史运行日志，供后续的故障追溯和性能分析使用。

更为重要的是，系统利用本次成功清洁后的最新图像数据，对步骤一中的基准特征向量库进行微量的迭代更新。如果环境光照或镜头老化导致基准特征发生缓慢漂移，系统会将当前的高质量图像特征以低权重融入基准库，使系统具备自我进化的能力，适应车辆全生命周期内的环境变化。

### 步骤 8.3：低功耗休眠模式激活与唤醒监听

完成数据归档后，系统随即进入低功耗休眠模式。关闭摄像头传感器的高频采样功能，停止执行机构的供电，仅保留核心控制电路和必要的传感器（如简易光强传感器或定时器）处于间歇性工作状态。在此模式下，系统的功耗降至最低，以适应车辆熄火后的长时间停放。然而，休眠并非完全停止，系统仍保持着对外部触发信号的监听。一

一旦接收到车辆启动信号、摄像头开启指令，或者简易传感器检测到环境光照发生剧烈变化（暗示可能发生了突发性污染），系统将立即从休眠中唤醒，重新执行步骤一的初始化流程。

### 步骤 8.4：全链路健康自检与长期运行报告生成

在每次进入休眼前或定期（如每行驶一定里程），系统还会执行一次全链路的健康自检。这次自检不同于步骤一的启动自检，它更侧重于长期运行后的状态评估，包括检查保护膜的累计位移次数、执行机构的磨损估算、密封结构的老化程度以及存储器的健康状态。系统根据这些检查结果，生成一份长期运行报告，评估系统当前的健康指数。如果各项指标均在正常范围内，系统确认下一周期的自主运行能力完好；若发现某项指标接近寿命极限（如保护膜即将用尽或密封圈弹性下降），系统会提前生成预防性维护建议，并通过车载信息系统通知用户。

以上显示和描述了本发明的基本原理、主要特征和本发明的优点。本行业的技术人员应该了解，本发明不受上述实施例的限制，上述实施例和说明书中描述的只是本发明的原理，在不脱离本发明精神和范围的前提下本发明还会有各种变化和改进，这些变化和改进都落入要求保护的本发明的范围内。本发明要求的保护范围由所附的权利要求书及其等同物界定。

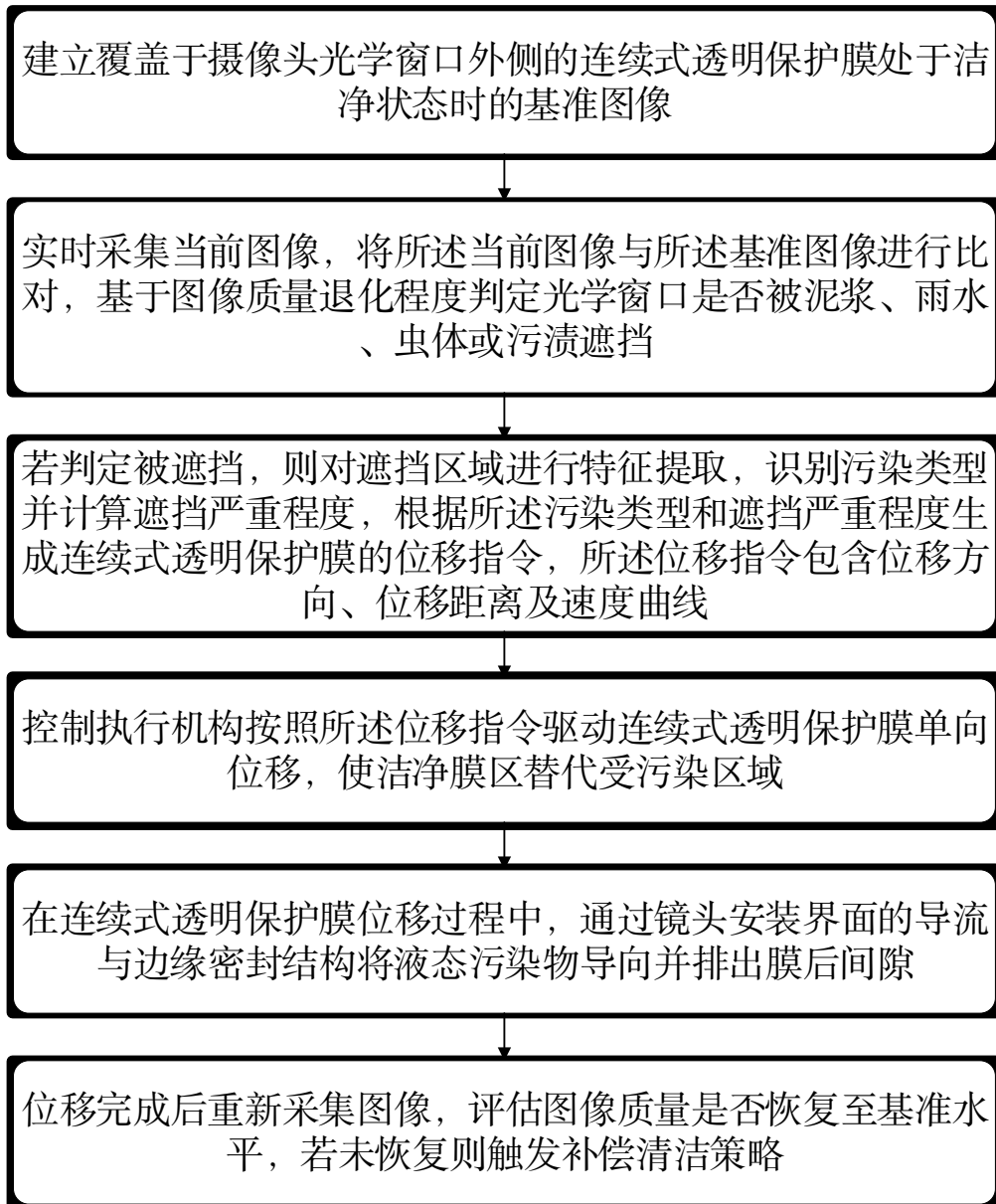


图 1

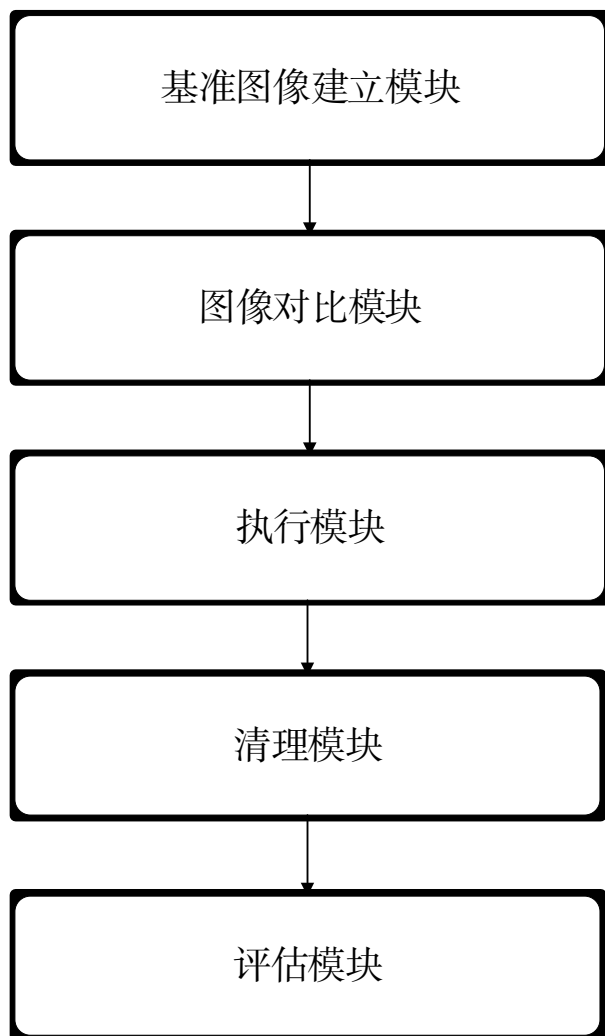


图 2