

说明书摘要

本发明涉及车辆行驶安全技术领域，具体公开了一种二进制分级充气调控方法及系统，通过融合多源感知数据预判碰撞严重度并计算目标能量，利用二进制编码组合实现药量的匹配，同时在充气过程中高频监测并动态激活备用气源形成闭环调节，最后依据推进剂总质量比例控制泄压孔开度；有效解决了能量供给偏差及过程不可调的问题，确保了全工况下压力衰减速率的高度一致，在避免初期过度冲击的同时抑制了后期回弹风险，显著提升了保护精度与安全性。

摘要附图

融合前向感知单元获取的障碍物相对运动参数与乘员状态监测单元获取的乘员物理参数，计算碰撞时间并预判碰撞严重度

基于所述碰撞严重度和所述乘员物理参数，通过物理建模计算气囊所需的目标展开能量，并从预设的离散化推进剂组合中选取总质量最接近所述目标展开能量的二进制编码组合，确定推进剂总质量

在碰撞触发信号产生时，通过冗余点火总线同步点燃所述二进制编码组合对应的推进剂，驱动充气罐升压并破裂爆破盘，启动首阶段充气

在充气过程中，以10千赫兹频率实时采集气囊内部压力或乘员穿透深度变化率，将气囊内部压力或乘员穿透深度变化率与预设的安全减速曲线动态比对，若检测到乘员下沉过快，则在5至8毫秒内激活下一可用充气阶段

在气囊内部压力达到峰值后，通过按推进剂总质量比例设计的织物泄压孔进行可控泄放，使压力衰减速率保持一致

1. 一种二进制分级充气调控方法，其特征在于，包括：

融合前向感知单元获取的障碍物相对运动参数与乘员状态监测单元获取的乘员物理参数，计算碰撞时间并预判碰撞严重度；

基于所述碰撞严重度和所述乘员物理参数，通过物理建模计算气囊所需的目标展开能量，并从预设的离散化推进剂组合中选取总质量最接近所述目标展开能量的二进制编码组合，确定推进剂总质量；

在碰撞触发信号产生时，通过冗余点火总线同步点燃所述二进制编码组合对应的推进剂，驱动充气罐升压并破裂爆破盘，启动首阶段充气；

在充气过程中，以 10 千赫兹频率实时采集气囊内部压力或乘员穿透深度变化率，将气囊内部压力或乘员穿透深度变化率与预设的安全减速曲线动态比对，若检测到乘员下沉过快，则在 5 至 8 毫秒内激活下一可用充气阶段；

在气囊内部压力达到峰值后，通过按推进剂总质量比例设计的织物泄压孔进行可控泄放，使压力衰减速率保持一致。

2. 根据权利要求 1 所述的二进制分级充气调控方法，其特征在于，所述障碍物相对运动参数包括相对距离与相对速度；所述乘员物理参数包括乘员质量、安全带载荷、座椅位置及靠背倾角；所述碰撞严重度通过加权合成相对速度、碰撞时间倒数与乘员质量因子确定。

3. 根据权利要求 1 所述的二进制分级充气调控方法，其特征在于，所述物理建模包括：依据碰撞严重度构建乘员安全减速曲线，积分计算乘员从碰撞初速度减速至零过程中需由气囊吸收的目标动能

耗散量，并扣除安全带预估吸收能量，确定所述目标展开能量。

4. 根据权利要求 1 所述的二进制分级充气调控方法，其特征在于，所述碰撞触发信号由加速度计在检测到合成加速度幅值超过机械触发阈值且积分速度变化量增长斜率符合碰撞波形特征时生成；所述冗余点火总线同步驱动多通道点火器引燃所述二进制编码组合对应的推进剂药片。

5. 根据权利要求 1 所述的二进制分级充气调控方法，其特征在于，所述动态比对包括：根据乘员穿透深度变化率反算乘员实际减速度，与所述安全减速曲线在对应时刻的允许减速度进行偏差计算，当偏差持续为正且超过容忍带宽时判定为乘员下沉过快。

6. 根据权利要求 1 所述的二进制分级充气调控方法，其特征在于，所述织物泄压孔的开度与分布密度依据所述推进剂总质量动态设定，使有效泄放面积与推进剂总质量呈非线性正相关，确保不同药量工况下气体逸出速率与气囊内剩余能量匹配。

7. 根据权利要求 1 所述的二进制分级充气调控方法，其特征在于，在所述可控泄放过程中，实时追踪乘员回退运动轨迹与速度矢量，当检测到乘员回退速度与气囊内部压力的耦合关系存在回弹风险时，动态增强泄放以降低气囊刚度，使气囊随乘员后退迅速塌陷。

8. 根据权利要求 1 所述的二进制分级充气调控方法，其特征在于，在碰撞事件结束后，感知车辆最终姿态的俯仰角与侧倾角，依据车辆最终姿态设定气囊残余支撑压力目标，并通过持续微泄或微量补气将气囊内部压力维持在所述残余支撑压力目标附近。

9. 根据权利要求 8 所述的二进制分级充气调控方法，其特征在于，在碰撞事件结束后，将全流程碰撞数据按时间戳打包存储至非易失性存储器，并对点火回路与传感器链路进行健康状态深度自检，依据自检结果执行系统复位或永久锁定逻辑。

10. 一种用于实现如权利要求 1-9 任意一项所述方法的二进制分级充气调控系统，其特征在于，包括：

前向感知单元，用于获取障碍物相对运动参数；

乘员状态监测单元，用于获取乘员物理参数；

电子控制单元，与所述前向感知单元和乘员状态监测单元信号连接，用于融合所述障碍物相对运动参数和乘员物理参数以计算碰撞时间并预判碰撞严重度，基于所述碰撞严重度和乘员物理参数通过物理建模计算气囊所需的目标展开能量，并从预设的离散化推进剂组合中选取总质量最接近所述目标展开能量的二进制编码组合以确定推进剂总质量；

冗余点火总线，与所述电子控制单元连接，用于同步点燃所述二进制编码组合对应的推进剂，驱动充气罐升压并破裂爆破盘；

充气模块，包括充气罐、爆破盘和多个按二进制编码组合布置的推进剂药片，所述冗余点火总线用于在碰撞触发信号产生时同步点燃所述二进制编码组合对应的推进剂药片，以驱动充气罐升压并破裂爆破盘，启动首阶段充气；

压力监测单元，用于在充气过程中以 10 千赫兹频率实时采集气囊内部压力或乘员穿透深度变化率；

所述电子控制单元还用于将所述气囊内部压力或乘员穿透深度变化率与预设的安全减速曲线动态比对，若检测到乘员下沉过快，则在 5 至 8 毫秒内通过所述冗余点火总线激活下一可用充气阶段；

泄压单元，包括按推进剂总质量比例精确设计的织物泄压孔，用于在气囊内部压力达到峰值后进行可控泄放。

一种二进制分级充气调控方法及系统

技术领域

本发明涉及车辆行驶安全技术领域，具体是涉及一种二进制分级充气调控方法及系统。

背景技术

现有气囊控制系统多采用基于碰撞加速度阈值的单级或固定双级点火策略，缺乏在碰撞前毫秒级时间窗内对前向感知数据与乘员实时状态的深度融合，导致无法精确计算匹配特定工况的理想展开能量，常出现小体型乘员受冲击过大或大体型乘员约束不足的现象。

此外，传统方案多为开环控制，一旦点火即无法根据乘员实际下沉速度动态补充气体，且泄压孔设计固定，无法随药量变化调整泄放面积，致使不同碰撞强度下气囊压力衰减速率不一致，易引发气囊回弹刚性造成二次伤害或支撑力过早丧失。

发明内容

本发明旨在提供一种二进制分级充气调控方法及系统，有效解决了能量供给偏差及过程不可调的问题。

为达到以上目的，本发明采用的技术方案为：一种二进制分级充气调控方法，包括：

融合前向感知单元获取的障碍物相对运动参数与乘员状态监测单元获取的乘员物理参数，计算碰撞时间并预判碰撞严重度；

基于所述碰撞严重度和所述乘员物理参数，通过物理建模计算气囊所需的目标展开能量，并从预设的离散化推进剂组合中选取总质量最接近所述目标展开能量的二进制编码组合，确定推进剂总质量；

在碰撞触发信号产生时，通过冗余点火总线同步点燃所述二进制

编码组合对应的推进剂，驱动充气罐升压并破裂爆破盘，启动首阶段充气；

在充气过程中，以 10 千赫兹频率实时采集气囊内部压力或乘员穿透深度变化率，将气囊内部压力或乘员穿透深度变化率与预设的安全减速曲线动态比对，若检测到乘员下沉过快，则在 5 至 8 毫秒内激活下一可用充气阶段；

在气囊内部压力达到峰值后，通过按推进剂总质量比例设计的织物泄压孔进行可控泄放，使压力衰减速率保持一致。

优选的，所述障碍物相对运动参数包括相对距离与相对速度；所述乘员物理参数包括乘员质量、安全带载荷、座椅位置及靠背倾角；所述碰撞严重度通过加权合成相对速度、碰撞时间倒数与乘员质量因子确定。

优选的，所述物理建模包括：依据碰撞严重度构建乘员安全减速曲线，积分计算乘员从碰撞初速度减速至零过程中需由气囊吸收的目标动能耗散量，并扣除安全带预估吸收能量，确定所述目标展开能量。

优选的，所述碰撞触发信号由加速度计在检测到合成加速度幅值超过机械触发阈值且积分速度变化量增长斜率符合碰撞波形特征时生成；所述冗余点火总线同步驱动多通道点火器引燃所述二进制编码组合对应的推进剂药片。

优选的，所述动态比对包括：根据乘员穿透深度变化率反算乘员实际减速度，与所述安全减速曲线在对应时刻的允许减速度进行偏差计算，当偏差持续为正且超过容忍带宽时判定为乘员下沉过快。

优选的,所述织物泄压孔的开度与分布密度依据所述推进剂总质量动态设定,使有效泄放面积与推进剂总质量呈非线性正相关,确保不同药量工况下气体逸出速率与气囊内剩余能量匹配。

优选的,在所述可控泄放过程中,实时追踪乘员回退运动轨迹与速度矢量,当检测到乘员回退速度与气囊内部压力的耦合关系存在回弹风险时,动态增强泄放以降低气囊刚度,使气囊随乘员后退迅速塌陷。

优选的,在碰撞事件结束后,感知车辆最终姿态的俯仰角与侧倾角,依据车辆最终姿态设定气囊残余支撑压力目标,并通过持续微泄或微量补气将气囊内部压力维持在所述残余支撑压力目标附近。

优选的,在碰撞事件结束后,将全流程碰撞数据按时间戳打包存储至非易失性存储器,并对点火回路与传感器链路进行健康状态深度自检,依据自检结果执行系统复位或永久锁定逻辑。

另一方面,本发明提出一种二进制分级充气调控系统,包括:

前向感知单元,用于获取障碍物相对运动参数;

乘员状态监测单元,用于获取乘员物理参数;

电子控制单元,与所述前向感知单元和乘员状态监测单元信号连接,用于融合所述障碍物相对运动参数和乘员物理参数以计算碰撞时间并预判碰撞严重度,基于所述碰撞严重度和乘员物理参数通过物理建模计算气囊所需的目标展开能量,并从预设的离散化推进剂组合中选取总质量最接近所述目标展开能量的二进制编码组合以确定推进剂总质量;

说明书

冗余点火总线，与所述电子控制单元连接，用于同步点燃所述二进制编码组合对应的推进剂，驱动充气罐升压并破裂爆破盘；

充气模块，包括充气罐、爆破盘和多个按二进制编码组合布置的推进剂药片，所述冗余点火总线用于在碰撞触发信号产生时同步点燃所述二进制编码组合对应的推进剂药片，以驱动充气罐升压并破裂爆破盘，启动首阶段充气；

压力监测单元，用于在充气过程中以 10 千赫兹频率实时采集气囊内部压力或乘员穿透深度变化率；

所述电子控制单元还用于将所述气囊内部压力或乘员穿透深度变化率与预设的安全减速曲线动态比对，若检测到乘员下沉过快，则在 5 至 8 毫秒内通过所述冗余点火总线激活下一可用充气阶段；

泄压单元，包括按推进剂总质量比例精确设计的织物泄压孔，用于在气囊内部压力达到峰值后进行可控泄放。

与现有技术相比，本发明的有益效果在于：

本发明通过融合多源感知数据预判碰撞严重度并计算目标能量，利用二进制编码组合实现药量的匹配，同时在充气过程中高频监测并动态激活备用气源形成闭环调节，最后依据推进剂总质量比例控制泄压孔开度；有效解决了能量供给偏差及过程不可调的问题，确保了全工况下压力衰减速率的高度一致，在避免初期过度冲击的同时抑制了后期回弹风险，显著提升了保护精度与安全性。

附图说明

图 1 为本发明二进制分级充气调控方法的流程图；

图 2 为本发明二进制分级充气调控系统的框图。

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，本发明提出一种二进制分级充气调控方法，通过多级离散药量组合与实时压力反馈，实现气囊展开能量与乘员保护需求高度匹配的具体执行过程，具体包括：

融合前向感知单元获取的障碍物相对运动参数与乘员状态监测单元获取的乘员物理参数，计算碰撞时间并预判碰撞严重度；

其中，障碍物相对运动参数包括相对距离与相对速度；乘员物理参数包括乘员质量、安全带载荷、座椅位置及靠背倾角；碰撞严重度通过加权合成相对速度、碰撞时间倒数与乘员质量因子确定。

通过融合车外障碍物运动趋势与车内乘员个体特征，该方案能够在碰撞发生前的极短窗口内构建高精度的事故场景模型，利用相对速度与碰撞时间的动态关系提前量化撞击烈度，并结合乘员质量及约束状态修正严重度评估结果；这种多维参数的加权合成机制显著提升了预判的鲁棒性，有效消除了单一加速度信号在碰撞初期存在的滞后与误判风险，为后续气囊展开能量的精准匹配提供了可靠的决策基准。

基于所述碰撞严重度和所述乘员物理参数，通过物理建模计算气囊所需的目标展开能量，并从预设的离散化推进剂组合中选取总质量最接近所述目标展开能量的二进制编码组合，确定推进剂总质量；

其中，物理建模包括：依据碰撞严重度构建乘员安全减速曲线，积分计算乘员从碰撞初速度减速至零过程中需由气囊吸收的目标动能耗散量，并扣除安全带预估吸收能量，确定所述目标展开能量。

通过物理建模将抽象的碰撞严重度转化为具体的能量需求，利用积分运算精确量化乘员减速全过程的动能耗散，并协同扣除安全带已分担的能量负荷，实现了气囊目标展开能量的精准解算；结合二进制编码组合的离散化选取策略，能够在有限的药片配置下以最小误差逼近理论最优值，既避免了因能量过剩导致的乘员冲击伤害，又防止了因能量不足引发的约束失效，确保了气囊展开刚度与特定工况下乘员保护需求的深度匹配。

在碰撞触发信号产生时，通过冗余点火总线同步点燃所述二进制编码组合对应的推进剂，驱动充气罐升压并破裂爆破盘，启动首阶段充气；进一步的，碰撞触发信号由加速度计在检测到合成加速度幅值超过机械触发阈值且积分速度变化量增长斜率符合碰撞波形特征时生成；所述冗余点火总线同步驱动多通道点火器引燃所述二进制编码组合对应的推进剂药片。

通过加速度幅值与速度变化斜率的双重校验机制生成触发信号，有效滤除了非碰撞工况下的机械振动干扰，显著降低了误爆风险；配合冗余点火总线同步驱动多通道点火器，不仅消除了单点故障隐患，更确保了二进制编码组合中所有推进剂药片在微秒级时间内被瞬时、同步引燃，实现了充气罐压力的快速建立与爆破盘的可靠破裂，为气囊在碰撞初期的极速展开提供了高可靠性与高一致性的动力源保障。

说明书

在充气过程中，以 10 千赫兹频率实时采集气囊内部压力或乘员穿透深度变化率，将气囊内部压力或乘员穿透深度变化率与预设的安全减速曲线动态比对，若检测到乘员下沉过快，则在 5 至 8 毫秒内激活下一可用充气阶段；

进一步的，动态比对包括：根据乘员穿透深度变化率反算乘员实际减速度，与所述安全减速曲线在对应时刻的允许减速度进行偏差计算，当偏差持续为正且超过容忍带宽时判定为乘员下沉过快。

通过高频实时监测构建了气囊充气的闭环反馈机制，能够敏锐捕捉乘员实际运动状态与理想安全曲线的微小偏差，及时识别因个体差异或工况波动导致的下沉过快风险；在毫秒级时间内动态激活补充充气阶段，实现了对气囊支撑刚度的“按需即时补偿”，有效避免了传统开环控制中因能量预设偏差造成的约束不足或二次撞击伤害，确保了全碰撞过程中乘员减速度的平稳性与一致性。

在气囊内部压力达到峰值后，通过按推进剂总质量比例设计的织物泄压孔进行可控泄放，使压力衰减速率保持一致。织物泄压孔的开度与分布密度依据所述推进剂总质量动态设定，使有效泄放面积与推进剂总质量呈非线性正相关，确保不同药量工况下气体逸出速率与气囊内剩余能量匹配。

在可控泄放过程中，实时追踪乘员回退运动轨迹与速度矢量，当检测到乘员回退速度与气囊内部压力的耦合关系存在回弹风险时，动态增强泄放以降低气囊刚度，使气囊随乘员后退迅速塌陷。

在碰撞事件结束后，感知车辆最终姿态的俯仰角与侧倾角，依据

车辆最终姿态设定气囊残余支撑压力目标，并通过持续微泄或微量补气将气囊内部压力维持在所述残余支撑压力目标附近。

另外，在碰撞事件结束后，将全流程碰撞数据按时间戳打包存储至非易失性存储器，并对点火回路与传感器链路进行健康状态深度自检，依据自检结果执行系统复位或永久锁定逻辑。

通过动态匹配泄压面积与推进剂药量，实现了不同碰撞烈度下压力衰减速率的一致性，有效规避了因气囊过硬导致的二次伤害；结合乘员回退轨迹的实时耦合控制，能够主动抑制回弹风险并实现气囊的自适应塌陷，提升了约束过程的柔顺性；碰撞后的姿态感知与残余压力维持机制，确保了车辆在侧翻或复杂姿态下对乘员的持续有效支撑；全流程数据黑匣子记录与深度自检逻辑，不仅为事故复盘提供了依据，更通过智能复位或锁定策略保障了系统在极端工况后的可靠性与可维护性。

另一方面，本发明提出一种二进制分级充气调控系统，如图 2 所示，包括：

前向感知单元，用于获取障碍物相对运动参数；

乘员状态监测单元，用于获取乘员物理参数；

电子控制单元，与所述前向感知单元和乘员状态监测单元信号连接，用于融合所述障碍物相对运动参数和乘员物理参数以计算碰撞时间并预判碰撞严重度，基于所述碰撞严重度和乘员物理参数通过物理建模计算气囊所需的目标展开能量，并从预设的离散化推进剂组合中选取总质量最接近所述目标展开能量的二进制编码组合以确定推进

剂总质量；

冗余点火总线，与所述电子控制单元连接，用于同步点燃所述二进制编码组合对应的推进剂，驱动充气罐升压并破裂爆破盘；

充气模块，包括充气罐、爆破盘和多个按二进制编码组合布置的推进剂药片，所述冗余点火总线用于在碰撞触发信号产生时同步点燃所述二进制编码组合对应的推进剂药片，以驱动充气罐升压并破裂爆破盘，启动首阶段充气；

压力监测单元，用于在充气过程中以 10 千赫兹频率实时采集气囊内部压力或乘员穿透深度变化率；

所述电子控制单元还用于将所述气囊内部压力或乘员穿透深度变化率与预设的安全减速曲线动态比对，若检测到乘员下沉过快，则在 5 至 8 毫秒内通过所述冗余点火总线激活下一可用充气阶段；

泄压单元，包括按推进剂总质量比例精确设计的织物泄压孔，用于在气囊内部压力达到峰值后进行可控泄放。

进一步的，上述各单元在执行时还用于实现上述的一种二进制分级充气调控方法的其他步骤，如下：

第一步骤：多源感知数据融合与碰撞时间窗判定

本步骤旨在利用车载传感器网络，在碰撞发生前的毫秒级时间窗口内，全面采集前方道路环境信息、车内乘员物理状态以及车辆自身的动态参数，并将这些异构数据进行时空对齐与融合，从而为后续的能量计算提供可靠的输入基础。该步骤的核心在于建立高精度的碰撞时间预测值，并同步锁定乘员在座椅上的具体姿态与质量分布，为判

断是否需要启动分级充气以及启动何种级别的充气提供初始依据。

步骤 1.1: 前向障碍物相对运动参数采集与初步筛选

依赖安装于车辆前保险杠格栅内部的高精度毫米波雷达以及位于挡风玻璃顶部的激光雷达协同工作。毫米波雷达以高刷新率发射调频连续波，接收从前方物体反射回来的信号，解算出目标物体相对于本车的径向距离、相对速度以及方位角；与此同时，激光雷达通过发射激光脉冲并测量飞行时间，构建出前方环境的三维点云图，用于识别障碍物的几何轮廓与类别属性。

系统将雷达测得的相对速度与激光雷达识别的障碍物类型进行交叉验证，剔除因路面颠簸或金属井盖造成的虚假目标，仅保留确认为车辆、行人或固定刚性障碍物的有效目标数据。在此过程中，系统记录当前时刻 t_0 的有效目标相对距离 $D(t_0)$ 与相对接近速度 $V_{rel}(t_0)$ ，这两个参数将直接作为下一步骤计算碰撞时间的直接输入量。若未检测到有效目标，则系统维持待机状态，不进入后续计算环节；一旦确认有效目标存在，即刻将 $D(t_0)$ 与 $V_{rel}(t_0)$ 传递至步骤 1.2，用于推导碰撞发生的紧迫程度。

步骤 1.2: 基于运动学模型的碰撞时间（TTC）动态推算

基于相对距离 $D(t_0)$ 与相对接近速度 $V_{rel}(t_0)$ ，结合车辆当前的纵向加速度 a_{ego} 与目标物体的预估加速度 a_{target} ，构建运动学方程以动态推算碰撞时间（TimeToCollision, TTC）。系统假设在未来极短的预测时域内，双方加速度保持恒定或按预设梯度变化，利用位移差为零的条件求解时间变量。具体的推算过程采用如下二次方程形式

进行求解，当判别式大于零时取最小正实根作为预测的碰撞时间

T_{tc} ：

$$D(t_0) + V_{rel}(t_0) \cdot T_{tc} + \frac{1}{2}(a_{target} - a_{ego}) \cdot T_{tc}^2 = 0 ;$$

式中， $D(t_0)$ 表示步骤 1.1 中获取的当前时刻本车与前车的相对距离，单位为米； $V_{rel}(t_0)$ 表示当前时刻的相对接近速度，单位为米每秒，当两车相互靠近时取正值； a_{ego} 为本车当前的纵向加速度，单位为米每二次方秒，减速时为负值； a_{target} 为前方目标物体的预估加速度，若目标为静止障碍物则该项为零； T_{tc} 为计算得出的预计碰撞发生时间，单位为秒。该公式的计算结果 T_{tc} 将被实时更新至控制单元，若 T_{tc} 小于预设的触发阈值（例如 150 毫秒），则判定碰撞不可避免，系统立即唤醒后续处理单元，并将 T_{tc} 数值连同当前的车辆减速度趋势一同传递给步骤 1.3，作为判定碰撞严重度的时间维度依据。

步骤 1.3：车内乘员状态多维参数同步采集

在判定碰撞即将发生的同时，并行启动对车内乘员状态的深度感知。系统调用布置在驾驶座与副驾驶座底部的重量传感器、集成在安全带卷收器内的载荷传感器以及座椅滑轨位置编码器，同步读取当前座位的实时数据。重量传感器输出乘员的总质量信号 M_{occ} ，该信号经过滤波处理后去除衣物或放置物品的轻微干扰，主要反映乘员骨骼与肌肉组织的真实质量；安全带载荷传感器监测安全带织带的张紧力 F_{belt} ，用以判断乘员是否已正确佩戴安全带以及预紧阶段的受力情况；座椅位置编码器则输出座椅前后滑动位置 P_{seat} 及靠背倾角

θ_{back} ，确定乘员胸部与方向盘或仪表板之间的初始空间距离。这些参数共同构成了乘员的物理特征向量，直接决定了在同等碰撞强度下乘员所需的约束力大小。步骤 1.3 将采集到的 M_{occ} 、 F_{belt} 、 P_{seat} 、 θ_{back} 打包，与步骤 1.2 输出的 T_{tc} 一并送入步骤 1.4，用于综合评估此次潜在碰撞对特定乘员造成的伤害风险等级。

步骤 1.4：碰撞严重度预判与触发使能信号生成

综合碰撞时间 T_{tc} 与乘员状态参数，执行碰撞严重度的预判逻辑。系统内部维护有一组基于大量事故数据标定的映射关系，将相对速度、碰撞时间倒数以及乘员质量因子进行加权合成，计算出一个无量纲的碰撞严重度指数 I_{sev} 。该指数的计算逻辑体现了速度越高、时间越短、乘员质量越大则潜在伤害越大的物理规律，具体表达形式如下：

$$I_{sev} = k_1 \cdot \frac{V_{rel}(t_0)}{T_{tc}} + k_2 \cdot M_{occ} \cdot \left(1 - \frac{P_{seat}}{P_{max}}\right) ;$$

式中， I_{sev} 为计算得到的碰撞严重度指数，数值越大代表预期碰撞越剧烈； k_1 为速度时间权重系数，由车辆结构刚度特性决定； $V_{rel}(t_0)$ 为步骤 1.1 测得的相对速度； T_{tc} 为步骤 1.2 推算的碰撞时间； k_2 为质量位置权重系数； M_{occ} 为步骤 1.3 测得的乘员质量； P_{seat} 为当前座椅位置； P_{max} 为座椅可调节的最大后移位置，该项比值反映了乘员与前部内饰件的初始间距，间距越小该项贡献越大。当计算出的 I_{sev} 超过预设的最低启动门限时，系统生成高电平的触发使能信号，标志着感知阶段结束，正式进入能量规划阶段。该使能信号携带

着 I_{sev} 的具体数值以及原始的 M_{occ} 和 $V_{rel}(t_0)$ 数据。

第二步骤：基于物理建模的目标展开能量计算与离散化映射

在接收到第一步骤生成的触发使能信号后，本步骤的核心任务是将抽象的碰撞严重度指数转化为具体的物理能量需求。系统利用预先建立的乘员-气囊耦合动力学模型，反向推导出为了将乘员减速控制在安全范围内所需的气囊内部总做功能力，即目标展开能量。随后，系统将这一连续的能量值映射到硬件层面可执行的离散化推进剂组合上，通过二进制编码逻辑寻找最优的药量配比方案，确保实际提供的能量既不过剩导致伤害，也不不足导致保护失效。

步骤 2.1：乘员安全减速曲线构建与目标动能耗散量确定

依据碰撞严重度指数 I_{sev} 与乘员质量 M_{occ} ，首先构建一条理想的安全减速曲线。该曲线定义了乘员在碰撞过程中随时间变化的允许最大减速度剖面，其峰值与持续时间需严格遵循人体生物力学耐受极限。系统根据 I_{sev} 的大小动态调整曲线的陡峭程度：对于高严重度碰撞，允许较高的峰值减速度但缩短作用时间；对于低严重度碰撞，则采用较平缓的减速度平台。基于这条预设的减速曲线 $a_{safe}(t)$ ，系统积分计算出乘员从碰撞初速度减速至零过程中需要被气囊吸收的目标动能耗散量 E_{target} 。该能量值的确定遵循功能原理，即气囊对乘员做的功等于乘员动能的变化量，同时扣除安全带已分担的部分能量。计算公式表述为：

$$E_{target} = \int_0^{t_{stop}} M_{occ} \cdot a_{safe}(t) \cdot v(t) dt - \eta \cdot E_{belt} ;$$

式中， E_{target} 为气囊需要提供的目标展开能量，单位为焦耳；

M_{occ} 为步骤 1.3 获取的乘员质量； $a_{safe}(t)$ 为基于 I_{sev} 生成的随时间变化的安全减速度曲线； $v(t)$ 为乘员随时间变化的瞬时速度，由初速度积分减速度得到； t_{stop} 为乘员完全停止运动的预估时刻； η 为安全带能量吸收效率系数，取值范围在 0 到 1 之间； E_{belt} 为安全带在相同工况下预估吸收的能量，由步骤 1.3 中的 F_{belt} 估算得出。计算得到的 E_{target} 代表了理论上的能量需求，该数值将被传递给步骤 2.2，作为选择推进剂组合的基准目标。

步骤 2.2：离散化推进剂药量库的检索与二进制编码定义

接收目标展开能量 E_{target} ，并在系统存储器中检索预设的离散化推进剂药量库。该药量库并非连续可变，而是由若干个固定质量的推进剂药片组成，每个药片对应一个特定的能量输出档位。为了实现能量的灵活调控，系统将这些药片按照二进制权重进行排列，例如设定基础单位药片质量为 m_0 ，对应能量为 e_0 ，后续药片质量依次为 $2m_0, 4m_0, 8m_0$ 等，形成 2^n 的递增序列。这种排列方式使得任意整数倍的基础能量都可以通过不同药片的组合来近似实现。系统定义一个二进制编码向量 $B = [b_n, b_{n-1}, \dots, b_1, b_0]$ ，其中每一位 b_i 取值为 0 或 1，分别代表对应权重的药片不被选中或被选中。步骤 2.2 的任务是明确当前硬件配置下的最大可用药片数量 N 以及各档位药片的单位能量产出率 ϵ （即单位质量推进剂产生的气体做功能力），并将这些参数与 E_{target} 一同传递给步骤 2.3，准备进行组合优化计算。

步骤 2.3：最优二进制编码组合的智能选取与误差最小化

基于药量库结构与二进制编码规则，执行智能选取逻辑，旨在找

到一个二进制编码组合，使其对应的总能量输出最接近步骤 2.1 计算出的 E_{target} 。系统遍历所有可能的二进制组合，或者采用贪心算法从最高位开始逐级匹配，计算每种组合下的理论总能量 E_{sum} ，并求出其与目标能量的绝对差值 ΔE 。选取的标准是使 ΔE 最小，且优先选择不超过 E_{target} 的组合以避免能量过剩，除非最小误差组合略高于目标值但仍在安全容限内。该优选过程的数学描述如下，目标是求解二进制向量 B^* ：

$$B^* = arg \min_B |E_{target} - \sum_{i=0}^N b_i \cdot (2^i \cdot m_0 \cdot \epsilon)| ;$$

式中， B^* 为最终选定的最优二进制编码向量； E_{target} 为步骤 2.1 确定的目标展开能量； b_i 为二进制向量的第 i 位，取值为 0 或 1； N 为步骤 2.2 确定的最大药片级数； m_0 为基础单位药片质量； ϵ 为单位质量推进剂的能量产出率。通过该公式运算，系统确定了具体需要点燃哪些级别的药片，例如若 $B^* = [0,1,0,1]$ ，则表示需要点燃第 1 级（ 2^1 ）和第 3 级（ 2^3 ）的药片。选定的编码向量 B^* 及其对应的总药量 M_{total} 被传递给步骤 2.4，用于生成具体的点火指令序列。

步骤 2.4：点火指令序列生成与冗余总线预加载

根据最优二进制编码向量 B^* ，将其转换为具体的硬件点火指令序列。系统将向量中值为 1 的位映射到对应的物理点火通道地址，生成一组包含通道号、点火延时（通常设为零以实现同步）以及电流脉冲宽度参数的指令包。考虑到车辆碰撞环境的极端恶劣性，系统采用双路冗余点火总线架构，将同一份指令包同时写入主总线和备用总线的发送缓冲区，并进行校验和比对，确保指令数据的一致性。

此外，还根据 M_{total} （总药量）预估首阶段充气所需的最大电流峰值，提前调整电源管理单元的电容放电策略，确保在点火瞬间能提供足够的瞬时功率。生成的指令序列处于“待触发”状态，静候碰撞物理事件的确认信号。一旦收到来自加速度计的碰撞触发信号，该指令序列将立即被执行。

第三步骤：碰撞触发瞬间的同步点火与首阶段快速升压

当车辆实际发生碰撞，车身结构开始承受冲击载荷时，本步骤负责捕捉这一物理事件的起始点，并立即执行第二步骤中预备好的点火指令。通过冗余总线同步驱动多路点火器，瞬间引燃选定的推进剂组合，产生大量高温高压气体。这些气体迅速充入折叠的气囊袋体，冲破爆破盘，推动气囊在极短时间内展开并建立初始压力场，为乘员提供第一道缓冲屏障。此过程强调响应的极速性与动作的同步性，确保在乘员身体前移接触气囊之前，气囊已完成大部分体积的展开。

步骤 3.1：加速度计信号特征提取与碰撞触发判据确认

持续监测安装在车辆中央通道或 B 柱内部的微机电系统加速度计输出的原始信号。在步骤 2.4 准备好点火指令序列后，系统进入高灵敏度的触发监听模式。加速度计以高于 10kHz 的频率采样三轴加速度数据，系统对数据进行高通滤波以去除低频路面噪声，并计算合成加速度的幅值及其变化率。当检测到合成加速度幅值在极短时间窗内超过预设的机械触发阈值，且其积分速度变化量（Delta-V）的增长斜率符合典型碰撞波形特征时，判定碰撞已经实质性发生。此时，系统生成一个硬件级的碰撞触发中断信号，该信号具有最高优先级，能

够立即打断其他非关键任务。这个中断信号的确立，标志着从预判准备状态正式切换至执行动作状态，它直接激活步骤 3.2 中的点火驱动电路，将之前预加载的指令序列付诸实施。

步骤 3.2: 冗余点火总线同步驱动与多通道并发点燃

在接收到碰撞触发中断信号后，立即解锁点火驱动电路的保险锁寄存器。系统同时向主用和备用两条点火总线广播步骤 2.4 中生成的点火指令序列。由于采用了二进制编码选定的多路药片可能分布在不同的充气模块中，总线控制器确保所有被选中的通道（即 B^* 中为 1 的位对应的通道）在同一时钟周期内接收到高电平点火脉冲。点火器内部的桥丝在微秒级时间内升温至发火点，引燃与之接触的初级引火药，进而引爆主装药推进剂。这一过程利用了爆炸反应的链式传递特性，确保所有选定级别的药片几乎同时开始燃烧。冗余设计保证了即使某条总线因碰撞变形而断路，另一条总线仍能可靠完成点火任务。所有通道并发点燃的动作产生了巨大的气体生成速率，这股气流汇聚后直接作用于步骤 3.3 中的充气罐内部，推动压力急剧上升。

步骤 3.3: 充气罐内压激增与爆破盘剪切破裂

随着药片的剧烈燃烧，罐内气体摩尔数迅速增加，温度飙升，导致罐内压力 P_{tank} 呈指数级上升。充气罐出口处设有一个经过精密计算的爆破盘，其材质厚度和刻痕深度是根据步骤 2.3 中选定的总药量 M_{total} 所预期的最大压力峰值进行匹配的。当罐内压力上升并超过爆破盘的额定破裂压力 P_{burst} 时，爆破盘上的预设刻痕处产生应力集中，随即发生剪切断裂。这一破裂过程必须在毫秒级时间内完成，以减少

气体流动的节流损失。破裂后的爆破盘碎片被拦截网捕获，防止其飞入气囊造成损伤，而高压气体则通过打开的通道高速喷出。爆破盘的及时破裂是气体从受限空间进入气囊袋体的关键开关，其开启时刻与开启面积直接决定了初始充气的流量特性，为步骤 3.4 中的气囊展开提供动力源。

步骤 3.4：气囊袋体快速展开与初始支撑压力建立

利用爆破盘破裂后释放的高速气流，驱动折叠收纳在方向盘或仪表板内的气囊袋体迅速膨胀。气体以超音速流入气囊内部，克服织物折叠摩擦力和周围空气阻力，使气囊在几十毫秒内从扁平状态恢复至设计体积。在展开初期，气囊内部压力 P_{bag} 快速建立，形成一个具有一定刚度的气垫。该初始支撑压力的建立速度必须快于乘员因惯性向前运动的速度，以确保在乘员胸部或头部接触气囊时，气囊已经具备了足够的反作用力来开始吸收动能。系统通过监测气囊展开过程中的体积变化率，间接评估充气效率。一旦气囊完全展开并接触到乘员身体表面，首阶段充气任务宣告完成，此时气囊内部的压力水平主要由步骤 2.3 选定的药量总量决定。

第四步骤：充气过程中的高频压力监测与动态闭环调节

在首阶段充气完成且乘员开始与气囊发生相互作用后，本步骤进入精细化的动态调节阶段。系统不再依赖预设的固定药量，而是通过高频传感器实时捕捉气囊内部压力波动或乘员侵入气囊的深度变化率，将其与预设的安全减速曲线进行实时比对。一旦发现实际减速效果偏离预期，例如乘员下沉速度过快表明支撑力不足，系统将立即自

主决策，在极短的时间延迟内激活预留的下一级充气阶段，补充额外气体以提升压力，从而形成实时的闭环压力调节回路，确保乘员在整个碰撞过程中始终处于最佳的保护压力场内。

步骤 4.1: 气囊内部状态高频数据采集与噪声抑制

紧接气囊展开并接触乘员的时刻，启动高频数据采集循环。系统利用嵌入在气囊织物内侧或安装在充气罐出口附近的压电式压力传感器，以 10kHz 的采样频率实时读取气囊内部瞬时压力值 $P_{real}(t)$ 。同时，若配置有光学或超声波位移传感器，系统同步采集乘员胸部相对于方向盘平面的穿透深度 $d_{pen}(t)$ 。由于碰撞现场存在剧烈的机械振动和电磁干扰，原始信号中往往混有大量高频噪声。因此，步骤 4.1 首先对采集到的数据进行数字滤波处理，采用滑动平均或小波去噪方法，剔除异常跳变点，保留反映真实物理状态的趋势分量。处理后的压力值 $P_{filtered}(t)$ 和深度变化率 $\dot{d}_{pen}(t)$ 被封装成时间戳数据包，实时传送至步骤 4.2，作为判断当前保护状态是否偏离预设轨道的直接依据。

步骤 4.2: 实时状态与安全减速曲线的动态比对分析

接收实时状态数据包，并将其与第一步骤中构建的安全减速曲线 $a_{safe}(t)$ 进行动态比对。系统根据当前的穿透深度变化率 $\dot{d}_{pen}(t)$ 反算出乘员实际的瞬时减速度 $a_{act}(t)$ ，并将其与 $a_{safe}(t)$ 在同一时间点的允许值进行比较。比对的核心理论是检测乘员是否下沉过快，即实际减速度是否小于安全曲线要求的减速度，这通常意味着气囊内部压力不足以抵抗乘员的惯性冲击。

系统定义一个偏差指标 $\delta(t)$,用于量化当前状态与安全目标的差距。若 $\delta(t)$ 持续为正且超过设定的容忍带宽,则判定为支撑不足,需要补充能量。该比对过程是连续进行的,每一个采样周期都会更新一次判断结果,确保任何微小的偏离都能被及时捕捉。比对生成的偏差标志位 $Flag_{adj}$ 将传递给步骤 4.3,决定是否启动补充充气程序。

步骤 4.3: 偏差量化与补充充气阶段激活决策

依据偏差标志位 $Flag_{adj}$ 及具体的偏差数值 $\delta(t)$,执行补充充气的激活决策。若判定需要调整,系统立即查询剩余可用的推进剂药片资源。决策逻辑遵循最小够用原则,即选择能够消除当前偏差所需的最小一级药量,避免过度充气导致反弹伤害。系统计算所需的补充能量增量 ΔE_{add} ,该增量与当前的压力缺失量成正比,具体关系可通过简化比例模型表达:

$$\Delta E_{add} = K_p \cdot \int_{t_{detect}}^{t_{now}} (a_{safe}(\tau) - a_{act}(\tau)) d\tau ;$$

式中, ΔE_{add} 为计算得出的需要补充的能量增量,单位为焦耳;
 K_p 为比例增益系数,由气囊容积和气体热力学性质决定; t_{detect} 为步骤 4.2 检测到偏差的起始时刻; t_{now} 为当前时刻; $a_{safe}(\tau)$ 为预设的安全减速度曲线; $a_{act}(\tau)$ 为步骤 4.2 反算的实际乘员减速度。积分项代表了从发现偏差到当前时刻累积的速度亏损,反映了需要弥补的动能缺口。根据计算出的 ΔE_{add} ,系统从剩余药量库中匹配最接近的二进制档位,生成新的点火指令。该指令被标记为“动态补充”,并具有极高的执行优先级,要求在 5 至 8 毫秒内完成从决策到点火的全过程,以确保调节的时效性。

步骤 4.4: 次级点火执行与压力闭环修正

在做出激活决策后的 5 至 8 毫秒时间窗内, 迅速执行次级点火操作。系统通过冗余总线向选定的补充药片通道发送点火脉冲, 引燃额外的推进剂。新产生的高温气体汇入正在工作的气囊内部, 使气囊压力在短时间内再次跃升, 从而增大对乘员的支撑力, 修正此前出现的下沉过快现象。随着补充气体的加入, 步骤 4.1 采集到的压力值 $P_{real}(t)$ 开始回升, 乘员的实际减速度 $a_{act}(t)$ 逐渐回归到安全曲线 $a_{safe}(t)$ 的邻域内。系统持续监控这一修正过程, 一旦偏差 $\delta(t)$ 收敛至零或进入允许误差范围, 即停止进一步的充气动作, 维持当前压力水平。这一过程形成了一个完整的闭环反馈控制: 监测-比对-决策-执行-再监测, 确保无论碰撞工况如何复杂多变, 气囊都能动态适应乘员的运动轨迹, 提供持续且适度的约束力。

第五步骤: 峰值压力到达后的可控泄放路径构建与比例化开孔

当第四步骤中的动态闭环调节完成, 气囊内部压力随着乘员动能的吸收达到预设的峰值状态时, 系统必须立即从“充气增压”模式平滑切换至“可控泄压”模式。此步骤的核心在于防止气囊因内部压力过高而产生类似刚性墙体的反作用力, 避免在碰撞后期对乘员造成二次挤压伤害或导致乘员被猛烈回弹。系统依据第二步骤中确定的推进剂总质量, 激活一组预先设计好的织物泄压孔, 这些泄压孔的开度大小与分布密度严格遵循比例化原则, 确保在不同药量组合下, 单位时间内气体的逸出速率与气囊内剩余能量高度匹配, 从而实现压力衰减速率的一致性。

步骤 5.1: 峰值压力特征识别与泄压时序锁定

在压力闭环修正过程中，持续监测气囊内部压力 $P_{real}(t)$ 的变化趋势。在补充充气结束且乘员减速趋于平稳后，压力曲线会呈现一个明显的拐点，即压力由上升或持平转为即将下降的临界点，该点定义为峰值压力 P_{peak} 。系统通过检测压力对时间的一阶导数 $\frac{dP}{dt}$ 的符号变化来精准捕捉这一时刻：当 $\frac{dP}{dt}$ 由正变负或由零转为微小负值时，判定峰值已至。

此时，系统立即锁定泄压启动时序 t_{vent} ，该时刻标志着主动充气过程的彻底终结和被动泄压阶段的开始。锁定 t_{vent} 的同时，系统读取当前时刻的气囊内部绝对压力值 P_{curr} 以及温度估算值 T_{curr} （基于绝热膨胀模型推算），这两个参数将作为计算所需泄放面积的基准输入。

步骤 5.2: 基于推进剂总质量的泄放面积比例化计算

利用锁定的峰值压力时刻数据，结合第二步骤中选定的推进剂总质量 M_{total} ，执行泄放面积的比例化计算。由于不同工况下点燃的药片数量不同，产生的气体总摩尔数和热能差异巨大，若采用固定大小的泄压孔，会导致低药量工况下压力衰减过快（保护不足）或高药量工况下压力衰减过慢（伤害风险）。

因此，系统采用一种动态映射逻辑，使有效泄放面积 A_{eff} 与推进剂总质量 M_{total} 呈非线性正相关关系。具体的计算逻辑遵循流体力学中的声速流排放原理，目标是将压力衰减速率控制在预设的安全窗口

内，其核心计算公式如下：

$$A_{eff} = C_d^{-1} \cdot \frac{M_{total} \cdot R \cdot T_{curr}}{P_{curr} \cdot \sqrt{\gamma \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}} \cdot \lambda_{decay}$$

式中， A_{eff} 为计算得出的目标有效泄放总面积，单位为平方米； C_d 为泄压孔的流量系数，取决于织物边缘的几何形状； M_{total} 为步骤 2.3 中确定的已点燃推进剂总质量； R 为气体常数； T_{curr} 为步骤 5.1 估算的当前气囊内气体温度； P_{curr} 为步骤 5.1 测得的当前峰值压力； γ 为气体的比热比； λ_{decay} 为期望的压力衰减率系数，由安全曲线定义。该公式确保了无论初始药量多少，计算出的 A_{eff} 都能使气体以恒定的相对速率排出，从而保证压力曲线的形态一致性。

步骤 5.3：织物泄压孔阵列的分级开启与流道打通

根据计算出的目标有效泄放面积 A_{eff} ，控制气囊织物表面的泄压孔阵列进行分级开启。气囊表面预先激光切割或编织有多组不同尺寸的微孔，这些微孔平时由一层高强度的密封薄膜覆盖，或通过特殊的折叠结构封闭。系统驱动微型热切刀或电磁拉索机构，按照 A_{eff} 的需求量，精确打开对应数量的微孔组。例如，若 A_{eff} 较小，则仅开启中心区域的小孔径组；若 A_{eff} 较大，则同时开启外围的大孔径组及增加开启数量。这一过程必须在毫秒级内完成，以形成畅通的气体流道。开启后的泄压孔构成了气体从气囊内部流向车舱环境的物理通道，其总流通截面积严格等于或略大于步骤 5.2 计算的 A_{eff} 值，以补偿实际流动中的边缘效应。

步骤 5.4：初始泄放流场建立与压力衰减速率校准

在打开泄压孔后，立即监测初始泄放流场的建立情况。高温高压气体通过新开启的孔隙高速喷出，形成射流，气囊内部压力 $P_{real}(t)$ 开始按照步骤 5.2 设定的逻辑下降。系统再次利用高频压力传感器采集压力下降的瞬时斜率 $\frac{dP}{dt}|_{initial}$ ，并将其与理论预期的衰减速率进行比对。若实际衰减速率偏离预期（例如因织物变形导致部分孔口遮挡），系统可通过微调剩余未开启孔组的开度进行即时补偿（若硬件支持多级调节），或记录该偏差用于后续的安全评估。此阶段的重点是确认压力衰减曲线是否平滑且符合预设的 λ_{decay} 指标，确保不会出现压力骤降导致的支撑力突然丧失。一旦确认流场稳定且衰减速率达标，系统即认为泄压路径构建成功，进入持续的受控泄放阶段，该阶段的压力数据将作为第六步骤中抑制回弹刚性的基础输入。

第六步骤：压力衰减过程中的回弹刚性抑制与二次伤害规避

在第五步骤建立了可控泄放路径后，气囊进入持续泄压阶段。本步骤的重点在于利用这一泄压过程，主动抑制气囊在乘员压缩后的回弹行为。传统气囊在泄压不畅时，往往像弹簧一样将乘员反弹回座椅，造成颈部甩鞭伤或与车内其他部件的二次碰撞。本步骤通过维持特定的压力-体积滞后环，确保气囊在乘员身体回退时提供柔和的跟随力，而非刚性推力。系统实时监控乘员的回退速度与气囊压力的耦合关系，动态调整泄放效率，确保在所有工况下压力衰减速率高度一致，从而有效规避二次伤害风险。

步骤 6.1：乘员回退运动轨迹与速度矢量实时追踪

在碰撞初期，乘员向前运动压缩气囊；而在达到最大穿透深度后，

乘员会在安全带约束和气囊反力作用下开始向后回退。系统利用步骤 4.1 中的位移传感器数据,实时计算乘员胸部的瞬时速度矢量 $v_{occ}(t)$ 。当检测到 $v_{occ}(t)$ 的方向由指向气囊(正值)转变为背离气囊(负值)时,标记为回退起始时刻 $t_{rebound}$ 。系统不仅记录速度大小,还分析加速度变化,以区分是自然的弹性回退还是因气囊过硬导致的剧烈反弹。追踪到的回退速度曲线 $v_{rebound}(t)$ 及其对应的时刻 $t_{rebound}$ 被传递给步骤 6.2,作为判断气囊回弹刚性是否过大的关键判据,防止乘员在回退过程中遭受过大的反向冲击。

步骤 6.2: 气囊-乘员耦合刚度评估与回弹风险量化

基于回退速度 $v_{rebound}(t)$ 和实时压力 $P_{real}(t)$,评估当前气囊与乘员之间的耦合刚度。理想的保护状态是气囊随着乘员的后退而迅速瘪塌,不产生额外的推力。系统定义一个回弹风险指数 R_{risk} ,该指数反映了气囊压力对乘员回退运动的阻碍程度。若压力下降速度慢于乘员后退速度,意味着气囊仍然保持较高刚度,存在推挤乘员的风险。量化公式表达为:

$$R_{risk} = \frac{P_{real}(t) \cdot A_{contact}}{|v_{rebound}(t)| \cdot \mu_{damp}} - K_{threshold};$$

式中, R_{risk} 为计算得出的回弹风险指数,正值越大代表回弹伤害风险越高; $P_{real}(t)$ 为当前气囊内部压力; $A_{contact}$ 为乘员与气囊的有效接触面积,由穿透深度估算; $v_{rebound}(t)$ 为步骤 6.1 测得的乘员回退速度(取绝对值); μ_{damp} 为系统的等效阻尼系数,反映织物摩擦和气体流动的能耗特性; $K_{threshold}$ 为安全阈值,超过此值即判定为刚性过大。该公式直观地揭示了压力、接触面积与回退速度之间的平衡

关系。计算出的 R_{risk} 值若超过安全界限，将触发步骤 6.3 中的增强泄放逻辑，强制降低气囊刚度。

步骤 6.3: 动态增强泄放逻辑执行与流阻主动降低

在判定存在回弹风险（即 $R_{risk} > 0$ ）时，立即执行动态增强泄放逻辑。系统不再局限于步骤 5.3 中预设的静态开孔方案，而是主动采取进一步措施降低流阻。这包括驱动额外的机械装置扩大现有泄压孔的开度，或者激活气囊背面的辅助排气阀（若配置），甚至通过控制气囊织物的特定褶皱展开以增加透气性。目标是人为地增大有效泄放面积 A_{eff} ，使得气体逸出速度显著加快，从而让气囊内部压力 $P_{real}(t)$ 迅速跌落至接近环境大气压的水平。

步骤 6.4: 二次伤害规避验证与压力平台平稳过渡

对执行的增强泄放效果进行最终验证，确保二次伤害风险已被规避。系统观察在乘员完全回退至座椅靠背的过程中，气囊内部压力是否维持在极低水平，且没有出现压力的异常回升或波动。同时，监测乘员背部的加速度信号，确认没有受到来自气囊的剧烈冲击脉冲。若压力曲线平滑下降并稳定在一个安全的低压平台，且乘员加速度在舒适范围内，则判定回弹抑制成功。此步骤还负责监控压力衰减的一致性，确保不同初始药量工况下的最终压力轨迹重合度高，证明系统的比例化泄放设计有效。验证通过后，系统确认气囊已完成其主要的动态保护任务，进入最后的稳定支撑与系统复位准备阶段。

第七步骤: 碰撞事件结束后的状态保持与环境适应性调整

当第六步骤确认回弹风险消除且乘员已稳定在座椅上时，碰撞事

件的剧烈动态过程宣告结束。然而，车辆可能处于侧翻、多次碰撞或危险环境中，气囊不能完全瘪塌消失，仍需保持一定的残余体积和形状，以提供持续的头部支撑或防止乘员在车辆翻滚中甩出。本步骤负责将气囊从动态调节模式切换至静态保持模式，根据车辆最终的姿态和环境传感器数据，调整气囊内部的残余压力，使其既能提供必要的支撑，又不会妨碍救援或造成不适，同时为可能的二次碰撞预留响应能力。

步骤 7.1：碰撞终止判据确认与动态调节模式退出

依据验证通过的压力平稳信号以及车辆整体运动状态的静止特征，确认碰撞事件已彻底终止。系统监测整车加速度信号，当其在连续一段时间（如 500 毫秒）内低于微小阈值，且车速为零或接近零时，判定主碰撞过程结束。此时，系统发出“退出动态调节”指令，停止所有高频的压力采样与闭环反馈计算，关闭步骤 4.3 中的补充充气决策逻辑，并冻结步骤 6.3 中的动态增强泄放动作。气囊控制系统从“毫秒级应急响应”状态转入“秒级状态维持”状态。这一模式的切换标志着系统不再追求极致的动态响应速度，转而关注长时间的能量效率与稳定性。模式切换完成的信号连同当前的气囊体积状态 V_{final} 一起传递给步骤 7.2，作为设定残余压力的基础。

步骤 7.2：车辆姿态感知与残余支撑压力目标设定

在退出动态模式后，调用车辆的惯性测量单元（IMU）数据，感知车辆最终的静止姿态，包括俯仰角 ϕ 和侧倾角 θ 。若车辆发生侧翻或大角度倾斜，乘员面临重力作用下的位移风险，气囊需要提供更强

的侧向或顶部支撑。系统根据姿态角的大小，动态设定一个残余支撑压力目标 P_{hold} 。对于正常停放姿态， P_{hold} 设定为较低值，仅需维持气囊形状；对于侧翻姿态， P_{hold} 则适当提高，以抵消重力分量对乘员的影响。设定逻辑遵循静力学平衡原则，确保气囊提供的支撑力矩足以平衡乘员重力的倾覆力矩。该目标压力 P_{hold} 的计算结果将作为步骤 7.3 中气体保留或补充控制的基准，确保气囊在不同事故场景下均能提供适宜的环境适应性支撑。

步骤 7.3：智能补气或持续微泄控制策略执行

根据设定的残余支撑压力目标 P_{hold} 与当前气囊实际压力 P_{curr} 的差值，执行智能控制策略。若 $P_{curr} > P_{hold}$ ，系统控制泄压孔保持微小的开启状态，进行持续微泄，直至压力降至目标值；若 $P_{curr} < P_{hold}$ （例如在极端侧翻需高压支撑且此前泄放过度），且系统中仍有微量备用气源或可利用的余热膨胀效应，则可执行一次微量的补气操作（若硬件具备此能力），或利用热气体的缓慢冷却收缩特性自然逼近目标值（通常采用前者更主动）。控制策略的核心是维持压力在 $P_{hold} \pm \Delta P$ 的窄带范围内。此过程是一个低速的积分调节过程，旨在以最小的能耗维持最佳的保护形态。

步骤 7.4：二次碰撞预警监听与系统待命状态重构

在维持残余压力的同时，重新激活部分感知功能，构建针对二次碰撞的预警监听机制。虽然主碰撞已结束，但车辆仍可能遭遇后方追尾或二次翻滚。系统将加速度计的采样频率从高频降至中频，但仍保持对突发高过载信号的敏感度。一旦检测到新的冲击信号，系统将立

即跳过复杂的能量计算流程，直接利用剩余的推进剂药量（若有）或当前的气囊状态进行快速响应。同时，系统重构内部状态机，标记当前为“事故后待命”状态，记录本次碰撞的所有关键参数（如点燃药量、最大压力、泄放时长等）至非易失性存储器，以备后续读取。这一状态的重构确保了系统在事故全生命周期内的连续保护能力，直到人工干预或电源切断。

第八步骤：全流程数据归档、故障自检与系统复位锁定

本步骤负责对本次碰撞事件的全流程数据进行完整的归档保存，并对系统各组件进行深度的故障自检。基于自检结果，系统决定是进入可恢复的复位状态还是永久锁定以防止误操作。此步骤不仅是对单次事件的总结，更是为后续的维修、事故分析及系统改进提供详实的数据支撑，确保整个安全生命周期的闭环管理。

步骤 8.1：全时序碰撞数据打包与非易失性存储

将第一步骤至第七步骤中产生的所有关键数据按时间戳顺序打包。这些数据包括但不限于：初始的 T_{ic} 与 I_{scv} 值、选定的二进制编码向量 B^* 、各阶段点火时刻、压力曲线 $P(t)$ 的全程记录、泄压孔开启序列、乘员运动轨迹数据以及最终的车辆姿态。为了保证数据的完整性与不可篡改性，系统采用循环冗余校验（CRC）或哈希算法对数据包进行处理，并将其写入车载事件数据记录系统（EDR）的非易失性存储区域。存储过程需克服碰撞可能导致的电源不稳问题，利用备用电容提供的能量确保写入完成。归档完成的数据包将成为事故重建的“黑匣子”信息，直接传递给步骤 8.2，作为故障诊断与责任判定的

原始依据。

步骤 8.2: 点火回路与传感器链路的健康状态深度自检

系统依次向未使用的点火通道发送微安级的检测电流，测量回路阻抗，判断桥丝是否完好、线路是否断路或短路；同时，对压力传感器、加速度计、重量传感器等进行零点漂移与量程校准测试，检查其在剧烈冲击后是否发生永久性损坏或性能退化。自检过程还会验证冗余总线的通信完整性，确保双路架构均未失效。任何检测到的异常都将被标记为故障代码（DTC），并记录故障发生的具體位置与类型。

自检结果（通过或失败）将直接决定系统的最终命运：若关键安全组件（如主点火回路）损坏，系统将进入永久锁定；若仅为次要传感器故障，则可能允许有限度的复位。自检报告传递给步骤 8.3，作为执行复位或锁定逻辑的决策输入。

步骤 8.3: 基于自检结果的系统复位或永久锁定逻辑执行

根据生成的自检报告，执行最终的系统状态处置逻辑。若自检结果显示所有关键安全组件功能正常，且剩余推进剂药量充足（针对部分展开工况），系统执行软复位操作，清除临时变量，重置状态机至初始待机模式，准备应对可能的下一次行驶任务（尽管通常建议事故后更换组件）。若自检发现任何不可恢复的硬件损伤、推进剂已耗尽或数据结构严重错误，系统立即执行永久锁定程序。锁定程序通过熔断关键保险丝或写入不可逆的锁定标志位，彻底禁用所有点火输出功能，防止在维修过程中因电气干扰导致的意外展开。这一逻辑确保了系统在受损后的绝对安全，避免了次生灾害的发生。

步骤 8.4: 外部通信接口状态广播与维修提示生成

将确定的最终系统状态通过车载网络（如 CAN 总线或以太网）广播至仪表盘、车载网关及远程遥测终端。若系统处于永久锁定状态，仪表盘将点亮专用的安全气囊故障指示灯，并显示具体的维修提示代码，告知驾驶员或救援人员气囊系统已失效，严禁继续行驶或尝试自行修复。若系统复位成功，则发送就绪信号，但仍建议进行专业检查。

此外，生成一份简明的维修摘要，包含已消耗的药片级别、需要更换的传感器列表及爆破盘状态，供维修人员快速读取。

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进步，这些变化和进步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。

说明书附图



图 1

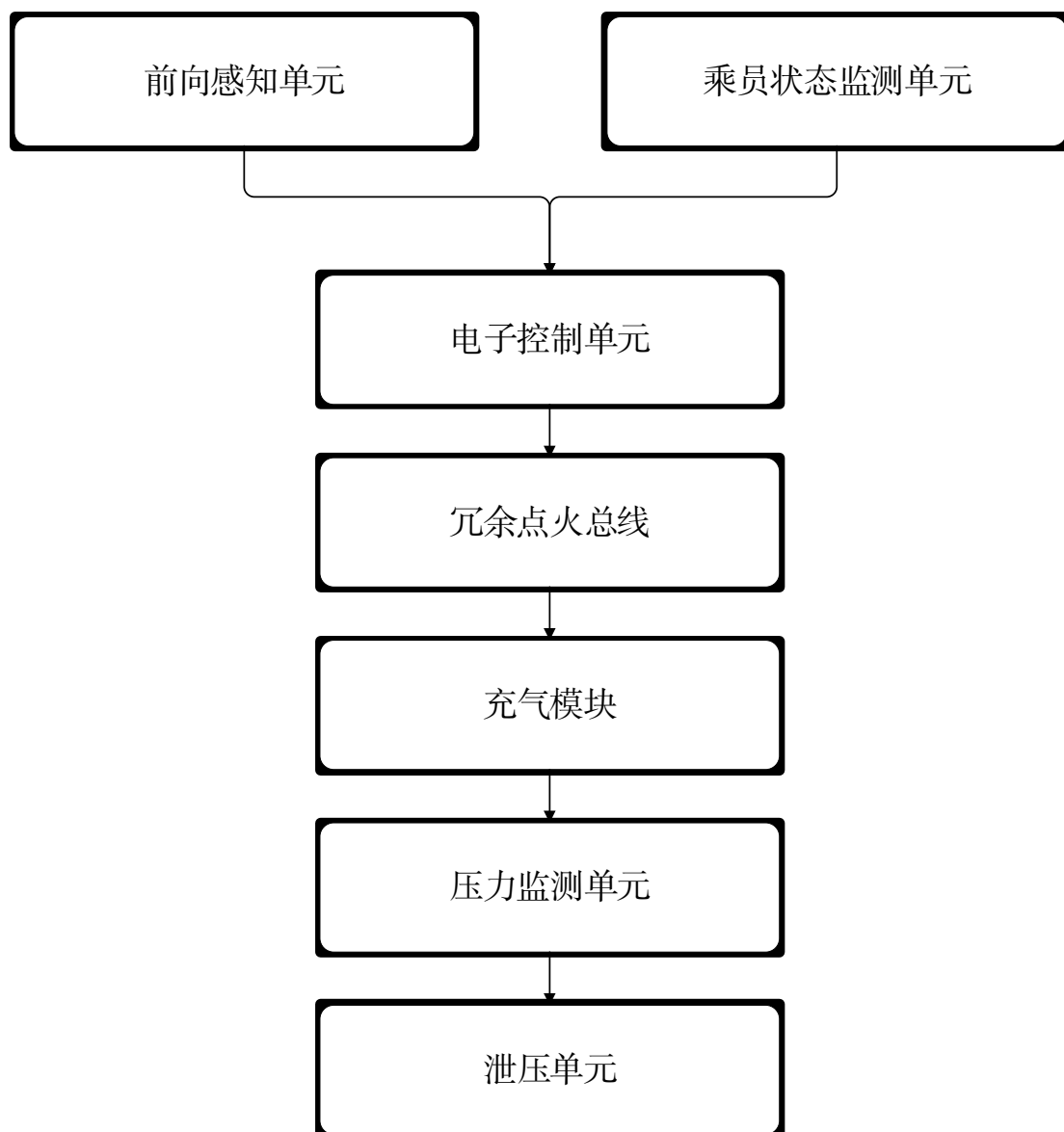


图 2